

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ,
PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

OPTIMALIZACE FLORBALOVÉ ČEPELE ZA VYUŽITÍ ADITIVNÍCH
TECHNOLOGIÍ

FLOORBALL BLADE OPTIMIZATION USING ADDITIVE
MANUFACTURING

AUTOR: Andrea Kadidlová

STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Lukáš Pelikán

Praha 2022



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kadidlová** Jméno: **Andrea** Osobní číslo: **491184**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Optimalizace florbalové čepele za využití aditivních technologií

Název bakalářské práce anglicky:

Floorball blade optimization using additive manufacturing

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do aditivních technologií
2. Porovnání aditivních technologií a vstřikování plastů
3. Návrh designu florbalové čepele vhodného pro výrobu 3D tiskem
4. Testování prototypových čepelí

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Pelikán ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Lukáš Pelikán
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně za pomoci odborné literatury uvedené v bibliografii.

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu práce Ing. Lukáši Pelikánovi za veškerý věnovaný čas a odborné rady. Zároveň bych chtěla poděkovat své rodině a přáteli, kteří mi byli oporou po celou dobu studia.

Anotace

Teoretickou část bakalářské práce tvoří rešerše, která přibližuje aditivní technologie, především metodu FDM (Fused Deposition Modeling), a přináší porovnání technologií polymerního 3D tisku a vstřikování plastů z pohledu ekonomického i technologického. Praktická část bakalářské práce se zabývá návrhem designu florbalové čepel pro výrobu technologií FDM. Součástí praktické části je testování čtyř navržených prototypů florbalových čepelí hráčkami Extraligy žen a následné vyhodnocení. Praktická část dále obsahuje ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova

Aditivní technologie, 3D tisk, FDM (Fused Deposition Modeling), prototyp, vstřikování plastů, florbalová čepel

Annotation

The theoretical part of the bachelor's thesis describes additive technologies, especially FDM (Fused Deposition Modeling) method, and compares polymer 3D printing with injection moulding from both economic and technological point of view. The practical part of the bachelor's thesis deals with the design and production of floorball blades using FDM technology. The practical part includes testing and subsequent evaluation of four floorball blades prototypes which were done by Czech Women's Extraliga players. In the practical part there is an economic evaluation as well.

Key words

Additive technology, 3D printing, FDM (Fused Deposition Modeling), Prototype, Injection Moulding, floorball blade

Obsah

1	Úvod	9
2	Motivace	10
3	Teorie.....	11
3.1	3D tisk	11
3.1.1	Historie 3D tisku	11
3.1.2	Rozdělení 3D tisku.....	12
3.2	3D tisk z polymeru	13
3.2.1	SLA	13
3.2.2	DLP	14
3.2.3	SLS.....	14
3.2.4	FDM.....	15
3.3	Materiály používané pro technologii FDM.....	16
3.3.1	PLA	16
3.3.2	PETG	17
3.3.3	ABS.....	18
3.3.4	ASA	19
3.3.5	PC.....	19
3.3.6	PP.....	20
3.4	Ovlivnění výsledných vlastností 3D tištěných součástí	20
3.5	Postprocessing.....	23
3.5.1	Úpravy povrchu	23
3.6	Technologie vstřikování plastů	27
3.6.1	Materiály pro vstřikolis.....	28
3.7	Porovnání vstřikolis a polymerního 3D tisku.....	29
4	Praktická část.....	31
4.1	Florbalová čepel	31
4.1.1	Základní rozdělení čepelí.....	31
4.1.2	Historický vývoj čepelí.....	31
4.1.3	Materiály florbalových čepelí	33
4.2	Požadavky na čepel	34
4.2.1	Objektivní požadavky dle IFF	34
4.2.2	Subjektivní požadavky ze strany hráče.....	35
4.3	Návrh modelu, nastavení parametrů ve sliceru a tisk	35
4.3.1	Prototyp č. 1	37

4.3.2	Prototyp č. 2	38
4.3.3	Prototyp č. 3	39
4.3.4	Prototyp č. 4	41
4.4	Postprocessing	42
4.5	Nasazení na hůl	43
5	Testování prototypů a vyhodnocení	44
5.1	Prototyp č. 1	45
5.2	Prototyp č. 2	47
5.3	Prototyp č. 3	49
5.4	Prototyp č. 4	51
5.5	Grafické srovnání	53
6	Ekonomické zhodnocení	55
7	Závěr	57
8	Bibliografie	59
9	Seznam obrázků	65
10	Seznam tabulek	66
11	Seznam grafů	67

1 Úvod

Aditivní technologie v posledních letech zaznamenávají velký rozmach napříč průmyslovými odvětvími. Polymerní 3D tisk, především pak technologie FDM, zaznamenal masové rozšíření i mimo průmysl mezi širokou veřejností. 3D tisk z kovu a kompozitních materiálů nachází v současné době stále větší využití v leteckém a automobilovém průmyslu, jeho role roste i v oblasti medicíny. V budoucnu se očekává expanze aditivních technologií i ve stavebnictví.

Jako se v oblasti průmyslové výroby dynamicky rozvíjí 3D tisk, ve sportovním odvětví zaznamenává podobný trend florbal. Jedná se kolektivní halový sport, který se velké oblibě těší především v zemích severní a střední Evropy, nicméně se stává stále populárnějším i v Asii a severní Americe.

Teoretická část bakalářské práce má za cíl přiblížit aditivní technologie, především pak metodu FDM, včetně nejpoužívanějších materiálů, skrze niž bude uskutečněna praktická část této bakalářské práce. Dále se teoretická část bude zabývat popisem technologie vstřikování plastů a jejím technologicko-ekonomickým porovnáním s polymerním 3D tiskem.

Praktická část bakalářské práce se bude zabývat návrhem designu florbalové čepele pro výrobu 3D tiskem, konkrétně metodou FDM. Cílem bude navrhnout prototyp florbalové čepele tak, aby svým designem co nejvíce vyhovoval především pro střelbu zápěstím a zároveň aby byla zachována jistá rovnováha mezi všemi důležitými kritérii, která jsou ze strany hráčů kladeny na florbalovou čepel. Při střelbě zápěstím je nejvíce namáhána špička čepele, v důsledku čehož měkne, a tím je negativně ovlivněna přesnost střelby. Prvotním krokem tedy bude vyztužení špičky, které by kromě oddálení deformace mělo při střelbě zlepšit přenos energie do míčku. Dále bude při návrhu potřeba kalkulovat se zachováním optimální rovnováhy mezi pevností a hmotností čepele. Na základě rešerše budou pro tisk zvoleny vhodné materiály tak, aby se vzniklé prototypy svými mechanickými vlastnostmi co nejvíce podobaly materiálům konvenčně vyráběných florbalových čepelí. Vzhledem k tomu, že 3D tištěné díly většinou vyžadují další opracování, bude třeba u vyrobených prototypů počítat s postprocessingem kvůli odstranění podpěrného materiálu a dosažení hladšího povrchu. Součástí praktické části bude testování a vyhodnocení vyrobených prototypů hráčkami Extraligy žen, české nejvyšší florbalové soutěže. Dále bude praktická část obsahovat ekonomické zhodnocení prototypů zhotovených technologií FDM a konvenčních čepelí vyráběných vstřikováním.

2 Motivace

Vzhledem k tomu, že mezi mé největší koníčky patří florbal a 3D tisk, rozhodla jsem se ve své bakalářské práci tato dvě odvětví spojit. Nejdůležitějším vybavením hráče v poli je hokejka, skládající se z hole, čepele a omotávky. Na nejvyšší úrovni každý florbalový klub spolupracuje s konkrétní firmou, která mu v rámci sponzoringu dodává florbalové hole. Florbalové hole různých výrobců se od sebe obecně liší například hmotností, designem a tvrdostí čepele, tvrdostí hole. Poslední roky jsem hrála s holemi značky OxDog, u nichž mi některé parametry týkající se čepelí nevyhovovaly. Z tohoto důvodu jsem se v rámci bakalářské práce rozhodla za pomoci 3D tisku vytvořit prototypy florbalových čepelí s cílem vylepšit nevyhovující parametry konvenčních čepelí, které jsou vyráběny vstřikováním.

3 Teorie

3.1 3D tisk

3D tisk je označován jako aditivní technologie, která spočívá v nanášení materiálu vrstvu po vrstvě, až vznikne konečný požadovaný objekt. Aditivní výroba je tedy opakem výroby subtraktivní, kdy je materiál odebírán (např. frézování, soustružení apod.). [1]

Prvním krokem v procesu aditivní výroby je zhotovení 3D modelu v konkrétním CAD programu (např. Fusion 360, Autodesk Inventor aj.). Model však může být vytvořen i pomocí skenování objektu. Další fází procesu je převedení CAD modelu do souboru STL. STL používá trojúhelníky (polygony) k popisu povrchů objektu. Po vygenerování souboru STL je soubor importován do programu slicer, kde uživatel nastaví parametry tisku (orientace modelu, typ a hustota výplně, výška vrstvy, perimetry, rychlost tisku, případné použití podpor atd.). Ve sliceru je pak STL soubor převeden na tzv. G-code, což je programovací jazyk používaný v počítačem podporované výrobě (CAM). G-code je následně načten na SD kartu, která se vloží do 3D tiskárny, a pak probíhá již samotný tisk modelu. 3D tištěné součásti často vyžadují postprocessing (dokončovací operace). Postprocessing se liší podle použité technologie tisku a účelu použití dané součásti. [1]

Jednou z hlavních výhod 3D tisku oproti konvenčním technologiím je rychlost výroby. Složité CAD modely lze nahrát a vytisknout během několika hodin. Ověření vyrobitelnosti, posouzení vzhledu a nalezení případných chyb tak ušetří značné množství času. U konvenční výroby je jednou z největších starostí konstruktéra, jak vyrobit součást co nejefektivněji. Většina dílů vyžaduje velké množství výrobních kroků, které společně s volbou jejich pořadí ovlivňuje výrobní čas, vyrobitelnost a kvalitu. Aditivní technologie nám však umožňují vyrobit díl v podstatně nižším počtu kroků, což dává konstruktérovi větší kontrolu nad konečným produktem. [2]

Mezi další výhody 3D tisku ve srovnání s konvenčními technologiemi patří: větší volnost při návrhu, možnost vytvoření složité geometrie, možnost změny designu prakticky kdykoli v průběhu výrobního procesu, malé množství odpadního materiálu. [2]

Na druhou stranu 3D tisk má také své limity. Jedním z nich je omezený sortiment materiálů. To je způsobeno skutečností, že ne všechny materiály mohou být dostatečně temperovány, aby umožnily 3D tisk. Co se týče nákladů, ty jsou u 3D tisku, na rozdíl od konvenčních technologií jako je např. vstřikování, statické. Nicméně přestože je vložený kapitál oproti vstřikování nižší, po cca tisícovce vyrobených kusů se rozdíl smazává a 3D tisk se přestává cenově vyplácet. Aditivní technologie tedy z finančního hlediska obecně nejsou vhodné pro velkosériovou výrobu. [3]

3.1.1 Historie 3D tisku

Polymerní 3D tisk

První záznamy o 3D tisku sahají do počátku osmdesátých let minulého století. Japonec Hideo Kodama v roce 1980 vynalezl 3D tiskárnu, pracující na principu vytvrzování fotopolymeru UV zářením, což nyní známe jako technologii SLA. Přestože Dr. Kodama požádal o patent, nesplnil všechny požadavky pro jeho získání, a jeho metoda 3D tisku tedy nebyla nikdy komercializována.

Prvním uznaným patentem se tak roku 1984 stala 3D tiskárna Američana Chucka Halla, fungující na stejném principu, s jakým přišel už Kodama. Hall také poprvé použil slovo stereolitografie (SLA). O dva roky později Hall založil vlastní společnost s názvem 3D Systems a v roce 1988 vyrobil první komerční 3D tiskárnu s názvem SLA-1.

V roce 1987 přišel americký student Carl Deckard s novou metodou 3D tisku - tzv. SLS (Selective Laser Sintering), která spočívá ve spékání polymerního prášku laserem. Ke komerčnímu využití SLS však došlo až o devatenáct let později, o což se zasloužila výše zmíněná společnost 3D Systems, když od Deckarda odkoupila licenci.

Rok po SLS „spatřila světlo světa“ technologie FDM (Fused Deposition Modeling), za jejímž vynálezem stojí Scott Crump. Tato metoda spočívá v roztavení polymerního materiálu ve formě vlákna a následném nanášení vrstev taveniny na tiskovou plochu.

Z pohledu rozšíření 3D tisku byl velmi významný tzv. RepRap Project (Replicating Rapid-Prototyper Project), se kterým v roce 2005 přišel anglický inženýr Adrian Bowyer. Nápad spočíval v tom, aby komponenty 3D tiskárny byly vyráběny právě technologií 3D tisku, což je výhodné z časového i ekonomického hlediska. Je důležité poznamenat, že projekt byl (a stále je) veden jako tzv. open source. To znamená, že veškeré zdrojové kódy jsou zdarma zpřístupněny veřejnosti a každý si je může upravovat podle sebe, což umožnilo zapojení lidí z celého světa. Projekt RepRap tedy způsobil masivní rozšíření 3D tiskáren do domácností.

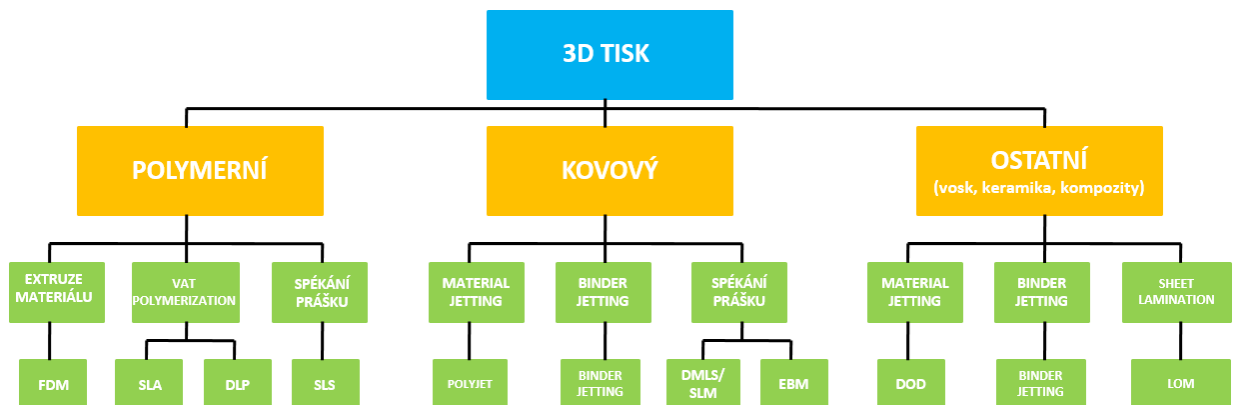
[4] [5] [6] [7]

Kovový 3D tisk

Dalo by se říci, že Deckardův objev technologie SLS v roce 1987 byl jakýmsi odrazovým můstkem pro 3D tisk z kovu. O rok později Dr. Ely Sachs z MIT poprvé tiskne z kovu, když vynalézá proces zvaný Binder Jetting. Technologie Binder Jetting ovšem nevyužívá pouze kov, ale také keramiku, sádro nebo křemičitý písek. V roce 1994 německá společnost EOS představuje stroj EOSINT M250, jehož princip je založen na technologii laserového spékání kovového prášku (DMLS). V roce 2000 byla společností Arcam AB patentována technologie EBM (Electron Beam Melting), využívající k roztavení a následnému spékání kovového prášku vysoce výkonný elektronový paprsek. [8]

3.1.2 Rozdělení 3D tisku

Nejzastoupenějšími materiály pro 3D tisk jsou v současné době polymery a kovy. Lze však tisknout i keramiku, vosk, kompozity nebo maltu. Na základě fyzikálního principu lze rozlišit následující skupiny: extruze materiálu (FDM), fotopolymerizace (SLA, DLP), spékání prášku (SLS, DMLS/SLM, EBM), Material Jetting (PolyJet, DOD), Binder Jetting (Binder Jetting), Sheet Lamination (LOM). Schematické rozdělení 3D tisku znázorňuje obrázek níže (Obrázek 1).



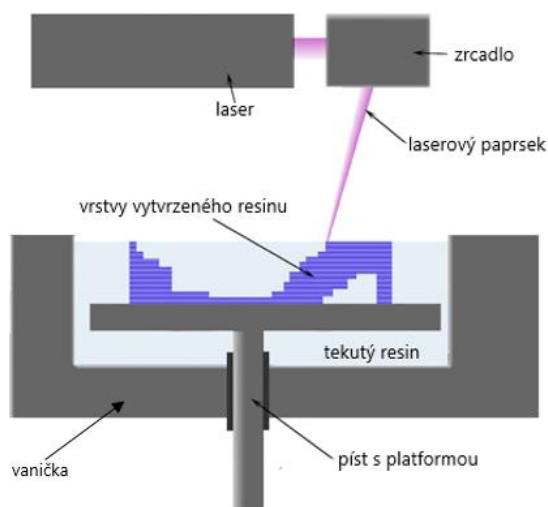
Obrázek 1 - rozdělení 3D tisku (upraveno) [9] [10]

3.2 3D tisk z polymeru

Tato kapitola shrnuje princip technologií polymerního 3D tisku, konkrétně SLA, DLP, SLS a FDM. Uvádí jejich výhody a nevýhody a využití v praxi. Technologie FDM je rozepsána podrobněji včetně používaných tiskových materiálů, jelikož praktická část bakalářské práce je uskutečňována právě s využitím technologie FDM.

3.2.1 SLA

Technologie SLA funguje na principu vytvrzování tekuté světlocitlivé pryskyřice (anglicky resin) pomocí UV záření. Objekt vzniká působením ultrafialového laserového paprsku na tekutý resin, který je laserem vytvrzován vrstvu po vrstvě. Po vytvrzení vrstvy se platforma posune dolů ve vertikálním směru o tloušťku další vrstvy, což bývá v rozmezí 0,05 až 0,15 mm, je nanese další vrstva resinu a vytvrzena laserem. Tento proces se stále opakuje, až je docíleno požadovaného tvaru daného objektu. [6] [9]



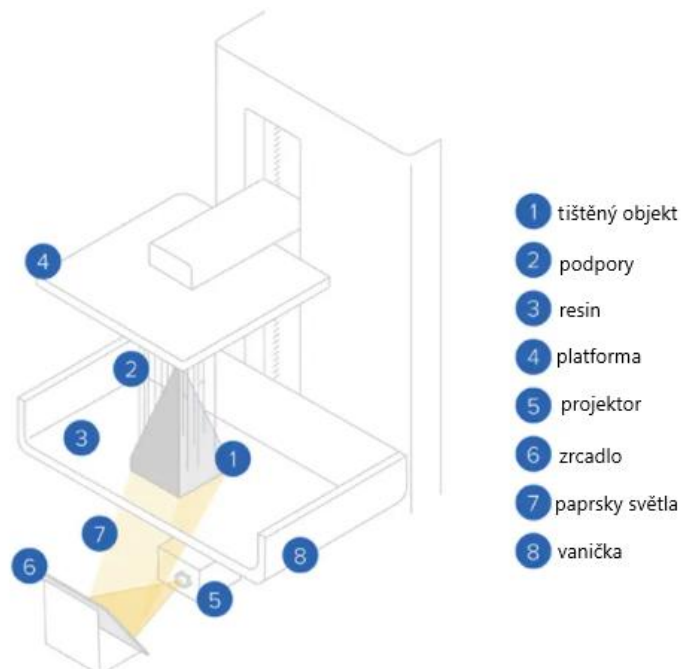
Obrázek 2- schéma SLA tiskárny [10]

Stereolitografie nachází uplatnění nejvíce v medicíně a šperkařství. Výtisky jsou hladké a velice detailní (oproti FDM na nich nejsou tolik vidět jednotlivé vrstvy materiálu).

Nevýhodou této technologie může být menší tisková plocha oproti FDM tiskárnám a toxicita resinu. Je potřeba vyvarovat se kontaktu resinu s pokožkou a dále je vhodné nosit ochranu dýchacích cest z důvodu uvolňování výparů. [6] [9]

3.2.2 DLP

DLP (Digital Light Processing) je aditivní technologie, fungující na stejném principu jako její předchůdce SLA - tedy na vytvrzování resinu působením světla. Jediný rozdíl mezi technologiemi spočívá ve zdroji světla - DLP využívá světlo z digitálního projektoru, zatímco SLA laserový paprsek. Projektor osvětluje vrstvu objektu v celé ploše (na rozdíl od SLA, kde dochází k vykreslování plochy bod po bodu), a proto je tisk metodou DLP efektivnější (rychlejší). Stejně jako SLA se i DLP hodí pro výrobu malých, detailních součástí. [11] [12]



Obrázek 3 - schéma DLP tiskárny (upraveno) [12]

3.2.3 SLS

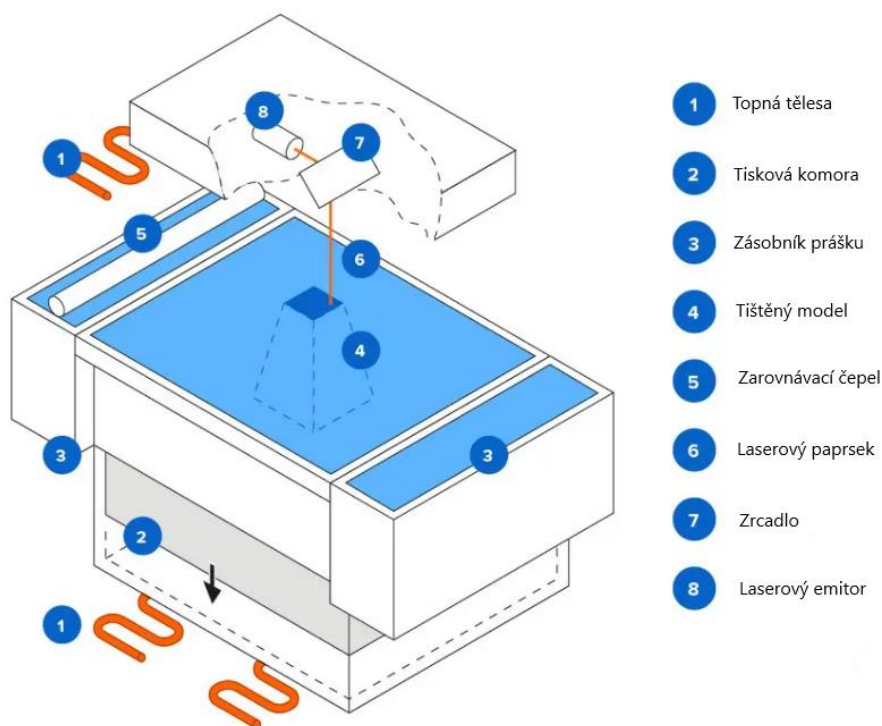
SLS (Selective Laser Sintering) je technologie, pracující na principu spékání polymerního prášku laserem. Na tiskovou podložku je nanášena vrstva prášku a čepelí zarovnána. Prášek se topným tělesem tiskárny přehřeje na teplotu těsně pod bod tání. Laserový paprsek poté skenuje plochu a zahřeje prášek na teplotu tání, čímž dojde k mechanickému spojení polymerních částic. Po vytvoření vrstvy se platforma posune dolů (typicky o 50 až 200 mikrometrů) a proces se opakuje, až dojde k vytvoření objektu. Po skončení tisku se musí konstrukční komora uvnitř mírně ochladit, aby byly zajištěny optimální mechanické vlastnosti a aby se zabránilo deformaci výtisků. [13] [14]

Technologií SLS vznikají součásti s dobrými, izotropními mechanickými vlastnostmi, a proto je použití SLS vhodné nejen k prototypování, ale i výrobě funkčních dílů.

Významnou předností je, že při tisku SLS nejsou potřeba žádné podpory, jelikož výtisk je obklopen zbytkovým nespečeným materiálem. Další výhodou je, že veškerý zbylý prášek lze znovu použít. [14]

Přestože tisk samotný je relativně rychlý, v současnosti jsou široce dostupné pouze průmyslové systémy SLS, v důsledku čehož jsou dodací lhůty delší než u ostatních technologií polymerního 3D tisku. Součástí i tiskárny je potřeba vyčistit od přebytečného prášku tryskáním. Povrch výtisků je porézní, a proto většinou vyžadují další postprocessing. [13] [14]

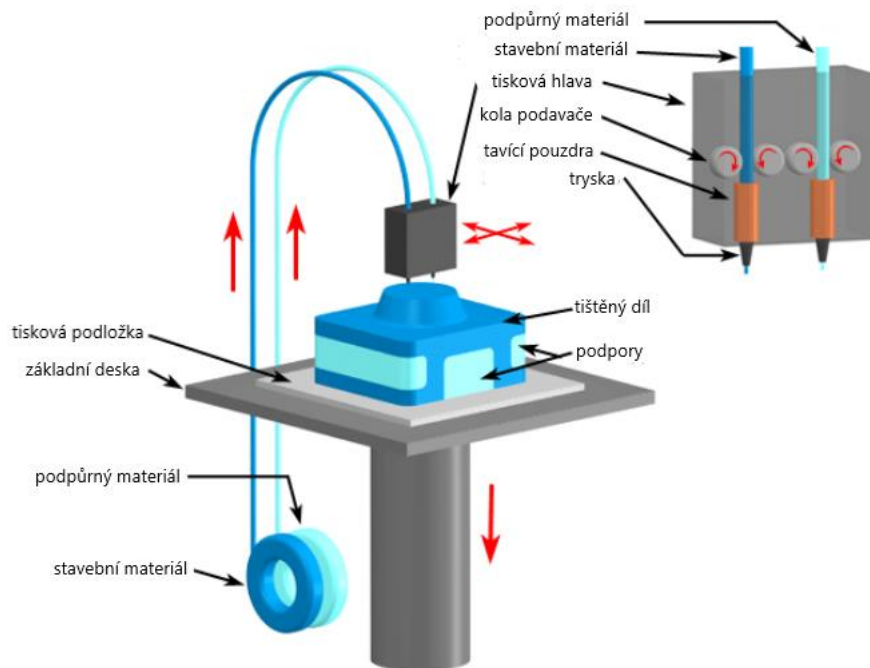
Se součástmi vyrobenými technologií SLS se můžeme setkat v medicíně (ortotika a protetika), při prototypování krytů vrtaček, motocyklů apod. [13]



Obrázek 4 - schéma SLS tiskárny (upraveno) [13]

3.2.4 FDM

FDM (Fused Deposition Modeling) je pro svou dostupnost nejrozšířenější aditivní technologií. Princip této metody spočívá v roztavení termoplastu ve formě vlákna (filament) o průměru nejčastěji 1,75 mm uvnitř tiskové hlavy, která taveninu vytlačuje na vyhřívanou tiskovou podložku. Po nanesení vrstvy se tisková hlava posune nahoru ve vertikálním směru o tloušťku vrstvy (u nejčastěji používaného průměru trysky 0,4 mm je rozmezí tloušťky vrstvy 0,05 až 0,3 mm) a je nanášena další vrstva materiálu. Celý proces se opakuje do doby, než je vytvořen finální tvar produktu. [6] [9]



Obrázek 5 - schéma principu FDM tiskárny (upraveno) [15]

FDM tiskárna může mít buď jednu, nebo více tiskových hlav. Pokud má tiskárna více tiskových hlav, lze jednu hlavu použít pro podpurný materiál. Ohřev materiálu na teplotu tavení zajišťuje topné těleso - hot end. Odstraňování podpor se provádí buď mechanicky - pokud jsou ze stejného materiálu jako výtisk samotný, nebo v případě odlišných materiálů chemicky (v rozpouštěcí lázni). Je důležité poznamenat, že podpory nejsou vždy potřeba. Pokud zvolíme vhodnou orientaci modelu, můžeme množství podpor snížit či dokonce zcela eliminovat. [16]

Technologií FDM je možné docílit dílů poměrně vysoké pevnosti. Proto se takto vyrobené součásti často využívají pro testování funkčních prototypů. Velké uplatnění nachází FDM metoda také v designu - na základě prototypu je posouzeno tvarové a funkční řešení. Mezi další přednosti FDM patří minimální množství odpadu, široká škála tiskových materiálů, nízké pořizovací a výrobní náklady. [17]

Hlavními nevýhodami jsou: hrubší struktura, delší tiskový čas a dále citlivost pro tvoření vrubů a s tím související nižší mez pevnosti. [16] [17]

3.3 Materiály používané pro technologii FDM

3.3.1 PLA

PLA (Polylactic Acid) je jedním z nejoblíbenějších materiálů pro 3D tisk. Je levný, snadno tisknutelný, nevyžaduje vysoké teploty tisku ani vyhřívanou podložku. PLA je zároveň biokompatibilním materiálem, a proto je hojně využíván v medicínských aplikacích. Zároveň je pro svou biologickou rozložitelnost jedním z nejekologičtějších filamentů na současném trhu. Vyrábí se rafinováním kukuřice anebo cukrové třtiny. PLA je sám o sobě potravinově nezávadný (food safe), avšak je potřeba, aby jako food safe

byla označena i tiskárna, na které se daným materiálem tiskne. Většina „domácích“ tiskáren tuto certifikaci však nemá.

Z PLA lze tisknout malé, vysoce detailní, jakož i velké díly. Je to materiál pro prototypování či tvorbu levných, nefunkčních (estetických) výrobků jako jsou hračky nebo šperky. Naopak není vhodné pro technické aplikace či venkovní použití, jelikož není teplotně příliš odolný (měkne už při 60 °C), podléhá rozkladu vlivem působení UV záření a je křehký. [18] [19]

Níže uvádím doporučené teploty při tisku z PLA:

- Teplota trysky: 210 až 215 °C
- Teplota podložky: 60 °C

Co se týče postprocessingu, výtisky z PLA lze za současného chlazení brousit. [19]

V tabulce (Tabulka 1) jsou shrnuty hlavní výhody a nevýhody PLA.

Tabulka 1 - výhody a nevýhody materiálu PLA [19]

PLA	
výhody	nevýhody
snadný tisk	křehký
levný	nízká odolnost vůči UV záření
slabé kroucení	nízká teplotní odolnost
vhodné pro detailní i velké modely	náročnější postprocessing

3.3.2 PETG

PETG (Glycol Modified Polyethylene Terephthalate) je glykolem modifikovaná verze běžně používaného polyethylentereftalátu (PET). Jedná se o polotuhý materiál s dobrou odolností proti nárazu, avšak větší náchylností na opotřebení. PETG se také vyznačuje výbornými tepelnými vlastnostmi, které umožňují účinné chlazení výtisku s téměř zanedbatelnou deformací. [18]

PETG je po PLA nejnějněji tisknutelný materiál a stejně jako PLA se vyznačuje nízkou cenou a potravinovou nezávadností. Díky relativně vysoké houževnatosti a tepelné odolnosti se PETG využívá především k tisku levných technických dílů, jako jsou např. komponenty 3D tiskáren. Mezi další vlastnosti PETG patří lesklý povrch, dobrá přilnavost a velmi slabé kroucení. Nevýhodou je tendence ke stringování (tvorbě vlásků) – je nutné více experimentovat s nastavením tiskárny. Dále je, na rozdíl od PLA, nutné použít vyhřívanou podložku (min. 80°C) a během tisku materiál chladit (pro zachování detailu a snížení stringování). [19]

Níže uvádím doporučené teploty při tisku z PETG:

- Teplota trysky: 230 až 240 °C
- Teplota podložky: 80 až 90 °C

Z dokončovacích úprav je nejvhodnější broušení - PETG lze snadno brousit za sucha i za mokra. [19]

V tabulce níže (Tabulka 2) jsou shrnuty hlavní výhody a nevýhody PETG.

Tabulka 2 - výhody a nevýhody materiálu PETG [19]

PETG	
výhody	nevýhody
snadný tisk	stringování
dobrá přilnavost vrstev	nehodné k tisku detailů
tuhý, odolný	velká přilnavost k podložce
slabé kroucení	špatné převisy a přemostění
vysoká teplotní odolnost	podpory se hůře odstraňují
voděodolný	nízká chemická odolnost

3.3.3 ABS

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) má ve světě 3D tisku dlouhou historii. Tento materiál byl jedním z prvních plastů, které byly použity v průmyslových 3D tiskárnách. O mnoho let později je ABS stále velmi oblíbeným materiálem díky své nízké ceně a dobrým mechanickým vlastnostem. ABS je známé svou houževnatostí a odolností proti nárazu, což umožňuje tisknout odolné mechanicky namáhané díly. ABS má vysokou teplotu skelného přechodu, což znamená, že materiál vydrží vysoké teploty, než se začne deformovat. [18]

Z ABS se vyrábí levné a mechanicky odolné díly - např. LEGO, kryty mobilních telefonů nebo automobilové díly. Jak je uvedeno výše, největšími výhodami ABS je houževnatost a vysoká mechanická a teplotní odolnost. Nevýhodami jsou horší odolnost proti UV záření, silné kroucení a nutnost zakrytí tiskárny, protože materiál zapáchá a během tisku se z něj uvolňují toxické výpary. U výtisků z tohoto materiálu je také potřeba počítat se skutečností, že se po vychladnutí smršťuje (cca o 1-2%).

Níže uvádím doporučené teploty při tisku z ABS:

- Teplota trysky: 255 °C
- Teplota podložky: 80 až 110 °C (závisí na velikosti tištěného dílu - větší díl vyžaduje vyšší teplotu) [19]

Postprocessing je nenáročný. Díly z ABS lze snadno brousit a vyhlazovat za pomoci acetonových par.

V tabulce níže (Tabulka 3) jsou shrnuty hlavní výhody a nevýhody ABS. [19]

Tabulka 3 - výhody a nevýhody materiálu ABS [19]

ABS	
výhody	nevýhody
vysoká mechanická odolnost	silné kroucení
vysoká houževnatost	nutnost krytu tiskárny
snadný postprocessing	toxické výpary (styrene)

3.3.4 ASA

ASA (Acrylic Styrene Acrylonitril) je materiál s vlastnostmi podobnými ABS. Původně byl vyvinut jako alternativa k ABS, která by byla odolnější vůči UV záření. ASA je známá vysokou odolností proti nárazu, dobrou teplotní odolností, ale na druhou stranu i zvýšenou obtížností tisku. Díky schopnosti velmi dobře odolávat UV záření a povětrnostním podmínkám se ASA namísto ABS běžně používá ve venkovních aplikacích. Hlavní nevýhodou je, stejně jako u ABS, silné kroucení a toxické výpary, které se uvolňují během tisku. [18] [19]

Níže uvádím doporučené teploty při tisku z ASA:

- Teplota trysky: 260 °C
- Teplota podložky: 105 až 110 °C

Co se dokončování týče, ASA se dá brousit za mokra i za sucha. Jelikož je ASA rozpustné v acetonu, lze u výtisků dosáhnout hladkého a lesklého povrchu. [19]

V tabulce níže (Tabulka 4) jsou shrnuty hlavní výhody a nevýhody ABS.

Tabulka 4 - výhody a nevýhody materiálu ASA [19]

ASA	
výhody	nevýhody
vysoká teplotní odolnost	silné kroucení
vysoká odolnost vůči UV	nutnost krytu tiskárny
velice detailní	toxické výpary
snadný postprocessing	nutné vysoké tiskové teploty
lze vyhlazovat a lepit acetonem	částečně hygroskopický

3.3.5 PC

PC (Polycarbonate) je tiskový materiál určený pro náročné strojírenské aplikace. Vyznačuje se vysokou teplotní odolností (150 °C), houževnatostí a pevností v tahu. Na druhou stranu je velmi hygroskopický - absorbuje vlhkost ze vzduchu, což negativně ovlivňuje tiskový výkon a pevnost výtisku. Proto by měl být skladován ve vzduchotěsných nádobách obsahujících silica gel (vysoušedlo), a před tiskem vysušen v troubě. PC také vyžaduje vysoké tiskové teploty, jinak vykazuje separaci vrstev. Čistý PC vykazuje špatnou přilnavost k podkladu a velkou tepelnou roztažnost, což způsobuje deformaci a praskání výtisků. Z tohoto důvodu jsou do PC přidávána různá aditiva, která zlepšují jeho tisknutelnost a výsledné vlastnosti výtisků. Nejčastěji je tedy filament vyráběn ve formě „blendů“ - využíváme mechanických vlastností PC, ale druhý materiál (velmi často ABS) pomáhá vylepšit tiskové vlastnosti. Výsledné vlastnosti materiálu jsou pak kombinací obou složek. [18] [19]

PC nachází uplatnění např. v automobilovém a leteckém průmyslu nebo elektrotechnice (kryty mobilních telefonů a dalších elektro komponent). [20]

Níže uvádím doporučené teploty při tisku z PC:

- Doporučená teplota trysky: 275 °C
- Doporučená teplota podložky: 110 až 115 °C

Postprocessing je oproti jiným materiálům náročnější. PC lze vyhladit pomocí methylethylketonových par. [21]

V tabulce níže (Tabulka 5) jsou shrnuty hlavní výhody a nevýhody PC.

Tabulka 5 - výhody a nevýhody materiálu PC [19]

PC	
výhody	nevýhody
vysoká teplotní odolnost	velmi hygroskopický
vysoká houževnatost	vysoké tiskové teploty
vysoká pevnost v tahu	silné kroucení
dobré elektrické Izolační vlastnosti	vysoká cena

3.3.6 PP

Polypropylen je lehký materiál, který se běžně používá při skladování a balení v potravinářství. Polypropylen je houževnatý a má dobrou odolnost proti únavě. PP je také chemicky odolný (proti kyselinám, zásadám a organickým rozpouštědlům). Semikrystalická struktura materiálu však způsobuje, že se 3D tištěné díly po ochlazení silně deformují, což ztěžuje proces tisku. Další nevýhodou je jeho vysoká cena. [18] [19]

Díky částečné ohebnosti je PP vhodný pro tisk součástí, jako jsou panty, popruhy, vodítka, řemínky aj. Vzhledem k dobré průsvitnosti se z tohoto materiálu často tisknou také tenkostěnné modely. [18] [19]

Níže uvádím doporučené teploty při tisku z PP:

- Doporučená teplota trysky: 220 °C
- Doporučená teplota podložky: 100 °C

V tabulce níže (Tabulka 6) jsou shrnuty hlavní výhody a nevýhody PP.

Tabulka 6 - výhody a nevýhody materiálu PP [19]

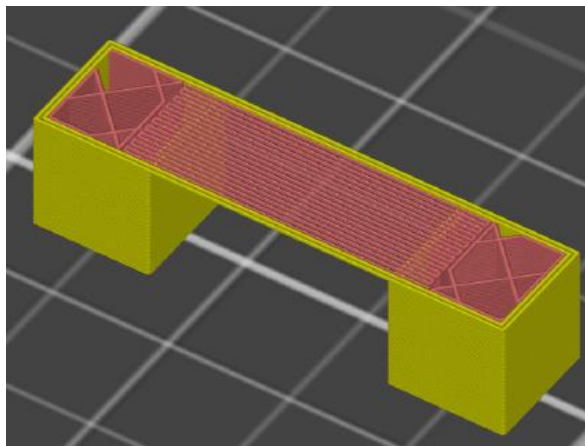
PP	
výhody	nevýhody
nízká hmotnost	silné kroucení
vysoká chemická odolnost	špatná přilnavost k podložce
vysoká houževnatost	vysoká cena

3.4 Ovlivnění výsledných vlastností 3D tištěných součástí

Před tiskem samotným bychom měli promyslet a nastavit řadu parametrů, které mají vliv na výsledné vlastnosti výtisku. V této kapitole bude uvedeno, jak jsou vlastnosti 3D tištěných součástí, vyrobených technologií FDM, ovlivněny orientací modelu, volbou tiskové teploty a rychlosti, výplní a perimetry, výškou vrstvy, a co umožňují modifikátory. Kapitola pojednává o technologii FDM, jelikož za pomoci této technologie bude provedena praktická část bakalářské práce.

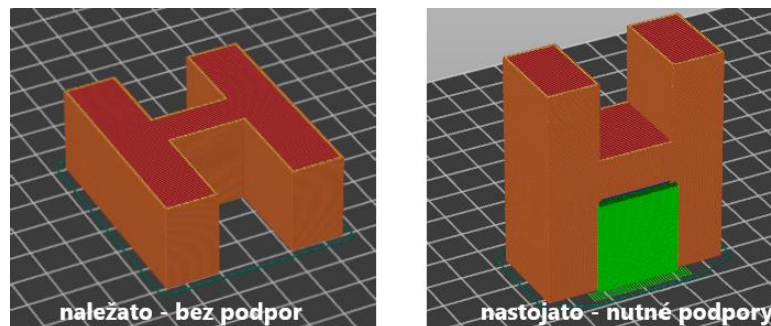
Orientace modelu

V závislosti na tvarové složitosti modelu je zapotřebí vzít v úvahu nutnost podpůrné konstrukce. Co se týče technologie FDM, použití podpor není vždy nutné. Vhodná orientace modelu může potřebu podpůrného materiálu minimalizovat či zcela eliminovat. Eliminace podpor má své výhody – především snížení tiskového času, menší množství spotřebovaného materiálu a snížení času stráveného postprocessingem. Při tisku technologií FDM lze tisknout objekty s převisy do 45° bez použití podpor. Při převisech nad 45° , které nejsou podepřeny, dochází k prohýbání modelu a hrozí jeho zhroucení. Obecně je tedy nutné používat podpory v částech modelu, které jsou tištěny pod úhlem větším než 45° . Existuje však jedna výjimka – tzv. bridging (přemostování). V případě přemostování dochází k natahování tiskových vláken mezi dvěma stejně vysokými objekty. Vzdálenost mezi těmito dvěma objekty však musí být maximálně 5 mm. V opačném případě by musela být použita podpůrná konstrukce. [22]



Obrázek 6 - ukázka přemostování (bridging) [6]

Nicméně pokud konkrétní model vhodně orientujeme na tiskovou podložku, nebudeme podpory vůbec potřebovat. Příkladem může být 3D model ve tvaru písmena H. Pokud ho orientujeme klasicky „nastojato“, bude potřeba podpůrná konstrukce. Pokud však písmeno H položíme „úplně naležato“, žádné podpory nebudeme potřebovat. Situaci s modelem písmena H znázorňuje obrázek níže (Obrázek 7).



Obrázek 7 - znázornění vlivu orientace na použití podpor (písmeno H)

Volba orientace také ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti součásti – především pevnost (v tahu). Na 3D model lze působit napětím v různých rovinách, na které bude model reagovat odlišně. Ve směrech os X a Y, v nichž je tisknuta jedna vrstva, bude výsledek vždy lepší, než v ose Z. Tento jev je způsoben adhezí mezi vrstvami. Vliv adheze se projevuje pouze v ose Z. V osách X, Y se mezivrstevová adheze neprojevuje, protože zde se obrysový tvar tiskne jedním tahem.

Výška vrstvy

Výška vrstvy je důležitý parametr, který ovlivňuje kvalitu povrchu výtisku. Čím je výška vrstvy větší, tím více jsou jednotlivé vrstvy vidět – povrch je hrubší. Z hlediska kvality je tedy nejvhodnější co nejnižší výška vrstvy. Naopak se tím prodlužuje doba tisku. Výška vrstvy je ovlivněna velikostí (průměrem) trysky. Platí, že výška vrstvy by vždy měla být maximálně 0,75 násobek průměru trysky. [6]

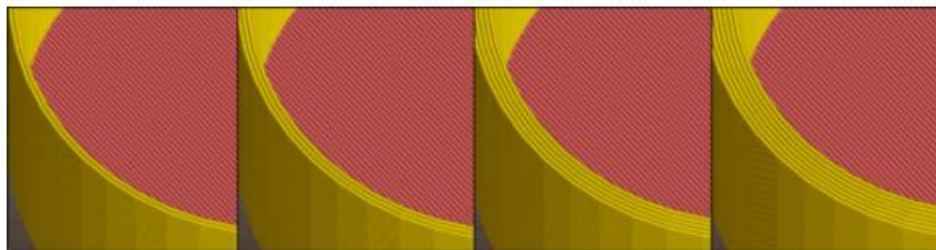
Výplň (Infill)

Drtivá většina součástí se netiskne se stoprocentní výplní. Je to především proto, že by se spotřebovalo velké množství materiálu, součást by měla zbytečně velkou hmotnost a tisk by trval příliš dlouho. Na druhou stranu navýšení mechanických vlastností by bylo jen nepatrné. Proto modely mají určitý stupeň výplně. Výplň (anglicky Infill) lze charakterizovat jako jakousi síťovou strukturu, která tvoří vnitřek modelu. V závislosti na požadovaných mechanických vlastnostech (především pevnost a houževnatost) si volíme hustotu výplně. [23]

Existuje mnoho druhů výplní, které se liší nejen svým vzhledem, ale především funkčními vlastnostmi. Např. PrusaSlicer verze 2.4.1 rozeznává 16 druhů výplní.

Perimetry

Perimetr je obvodová stěna tištěného objektu. Počet perimetrů udává, jak silná (tlustá) tato stěna bude. Perimetr je charakterizován šířkou, která se odvíjí od průměru trysky. Šířka jednoho perimetru je v důsledku teplotní objemové roztažnosti maličko větší než průměr trysky (u nejčastěji používané trysky o průměru 0,4 mm bývá šířka perimetru 0,45 mm). Počet perimetrů a jejich šířka ovlivňují výslednou pevnost součásti a dobu tisku – a to přímo úměrně. [6] [24]



Obrázek 8 – perimetry (žlutě) [24]

Rychlost tisku

Tisková rychlost je parametr úzce spojený s teplotou a velikostí trysky. Čím rychleji tiskneme, popř. čím větší průměr trysky používáme, tím vyšší musí být teplota tisku, aby došlo ke správnému natavení materiálu podávaného do trysky. Dále platí, že perimetry jsou zpravidla tištěny nižší rychlostí než výplň. [25]

Modifikátory

Pomocí tzv. modifikátorů můžeme měnit tiskové parametry modelu na lokální úrovni. Například chceme, aby v určitém exponovaném místě dosahovala součást vyšší pevnosti. Použitím modifikátoru lze v dané části zvýšit hustotu výplně nebo počet perimetrů. To je výhodné především proto, že zvýšením hustoty výplně (nebo perimetrů) jen v určité části modelu nedojde k výraznému nárůstu hmotnosti a spotřeby materiálu. Další věc, kterou modifikátory umožňují, je odebrání vrchních a spodních vrstev - např. za účelem zhotovení designově zajímavého výrobku. [26]

Tiskové teploty

Tiskovými teplotami se (v případě FDM) myslí teplota trysky a teplota tiskové podložky. Obojí závisí na volbě tiskového materiálu. Teplota trysky musí mít minimálně teplotu tavení materiálu. Teplota podložky je důležitá proto, aby na ní výtisk dobře držel. Každý výrobce filamentů uvádí doporučené rozmezí tiskových teplot pro daný materiál. Pokud by toto nebylo dodrženo, hrozí zhoršení mechanických vlastností výtisku či jeho deformace během tisku. [25]

Doporučené teploty tisku technologií FDM (podle společnosti PrusaPrinters) jsou uvedeny v kapitole 3.2.4

3.5 Postprocessing

Většina výtisků vyžaduje postprocessing, tedy dokončovací operace. Postprocessing se v případě polymerních materiálů většinou provádí za účelem zlepšení vlastností povrchu (snížení porozity a drsnosti, zlepšení vzhledu), mechanických vlastností nebo zvýšení teplotní a chemické odolnosti. [27]

3.5.1 Úpravy povrchu

Odstranění podpor

Podpory lze odstranit buď mechanicky, nebo chemicky. Mechanickým odstraněním se myslí použití kleští, lámacího nože, pilky apod., jejichž pomocí podpory ulámeme. Chemické odstranění spočívá v ponoření výtisku do chemické lázně (např. hydroxid sodný s vodou), ve které se podpory rozpustí. Tato možnost se využívá v případech, kdy jsou podpory z jiného materiálu (který musí být rozpustný) než součást samotná (aby nedošlo k její degradaci). Podpůrné materiály s označením BVOH a PVA se používají při tisku součástí z PLA a lze je rozpustit v teplé vodě. Podpory z HIPS se používají u součástí z ABS/ASA a dají se rozpustit v lemonsolu. [6]

Broušení

Výtisky se často brousí, aby se odstranily zbytky podpor, stopy po stringování a jiné vady, či aby bylo dosaženo nižších hodnot drsnosti. Nejčastěji se (především díky jednoduchosti a široké dostupnosti) plastové výtisky brousí brusnými papíry nebo houbičkami. Zrnitost (počet zrn na cm^2) brusného papíru závisí na výšce vrstvy a kvalitě tisku. Běžně se zrnitost pohybuje od 40 do jednotek tisíc. Nejprve, pro odstranění větších

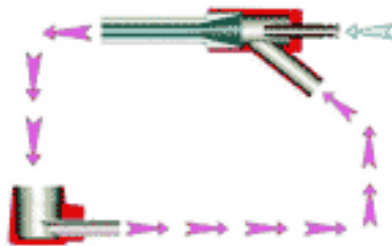
nerovností, se používají brusné papíry s nižšími hodnotami zrnitosti, až potom přecházíme k jemnějším brusným papírům. Brousit lze za sucha i za mokra, ale mokré broušení je vhodnější, jelikož se tak minimalizuje hromadění tepla vznikajícího třením. [27]

Tryskání

Tryskání je jedna z nejpoužívanějších mechanických úprav povrchu. Cílem této technologie je dosažení hladkého, matného povrchu výtisku. Princip tryskání spočívá ve vrhání abraziva na povrch výtisku a to buď pneumaticky, nebo mechanicky. Používají se různá abraziva: kovy (Fe, Cr, Ni), keramika, sklo, křemičitý písek, balotina nebo také plast, dřevo, skořápky ořechů aj. [28] [29]

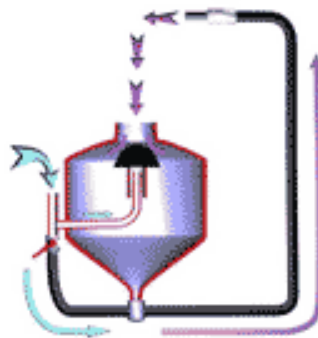
Pneumatické tryskání využívá k vrhání abraziva stlačený vzduch. Rozlišujeme pneumatické tryskání injektorové a tlakovzdušné.

Injektorové tryskání využívá nasávání tryskacího média do pistole, kde je proudem vzduchu urychleno a usměrněno. Po dopadu na povrch součásti se tryskací tělíska odrazí do komory, odkud jsou opět nasávány do pistole. Režim pracovního cyklu je kontinuální. [30] [31]



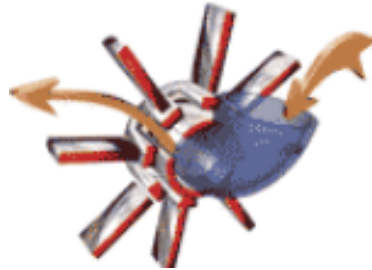
Obrázek 9 - injektorové tryskání [30]

Tlakovzdušné tryskání je oproti injektorovému cca 4x efektivnější. Součástí systému je tlaková nádoba, která slouží jako zásobník tryskacího média. Tlaková nádoba se utěsní a natlakuje. Abrazivum je tak vháněno do hadice, kde dojde ke smísení se vzduchem. Tato směs pak vystupuje tryskou ven. Po dopadu na povrch součásti se abrazivum odrazí do komory, kde se shromažďuje. Až se tlaková nádoba vyprázdní, je do ní nashromážděné abrazivum dodáno a celý proces začíná znovu. Režim pracovního cyklu je diskontinuální. [30] [31]



Obrázek 10 - tlakovzdušné tryskání [30]

Na mechanickém principu fungují metací kola. Oproti výše zmíněným způsobům jde o méně nákladnou metodu, avšak výběr tryskacích médií není tak velký. Princip je následující: ke kolu, rotujícímu rychlostí až 10 m/s, je přiváděno abrazivum, které vzniklá odstředivá síla vrhá směrem k povrchu součásti. [30]



Obrázek 11 - mechanické tryskání (metací kolo) [30]

Omílání

Omílání se využívá pro vyhlazení povrchu součásti (ať už za účelem designu nebo snížení tření), zaoblení hran, případně k odstranění staré barvy. Ošetřovaná součást je umístěna společně s omílacími tělísky do nádoby, která vibruje nebo koná rotační pohyb okolo své osy. Vibrační omílání je výkonnější, rotační omílání se hodí pro menší součásti. Omílací tělísky mohou být přírodní (dřevěné piliny, kousky kůže) nebo syntetické (ocelové kuličky, karbid křemíku). [32] [33]

Lepení

Vzhledem k omezené velikosti tiskové plochy/komory, jsou rozměrnější součásti rozděleny na více dílů, které se následně spojují dohromady lepením. K lepení se používají rozličná lepidla na plasty (např. kyanoakrylátová lepidla) nebo organická rozpouštědla jako např. aceton (též známý jako dimetylketon, používá se pro lepení dílů z ASA /ABS) či tetrahydrofuran (pro lepení dílů z PLA, PETG). Před lepením za použití lepidla je třeba součást očistit a odmastit. Také je vhodné před aplikací lepidla spojované plochy zbrousit (např. smirkovým papírem) - zdrsňuje tím povrch a vzniklé spojení bude pevnější. Lepení organickými rozpouštědly spočívá v naleptání povrchu součásti v místech, která chceme spojit. Před naleptáním je nutné povrch očistit a odmastit. Rozpouštědlo se na povrch součásti nanáší štětečkem. [27] [34] [35]

Tmelení

Účelem tmelení je vyplnění pórů, mezírek nebo rýh po broušení výtisku. Nejčastěji se využívají tmely na bázi silikonu či akrylu. Nejprve je nutné součást očistit a odmastit. Tmel se nanáší štětcem a poté se uhladí. Nanesený tmel se nejprve vytvrdí a poté ještě zbrousí, aby se odstranily případné nerovnosti. [36] [37]

Barvení a lakování

Barvení a lakování se provádí z důvodu ochrany výtisku před vnějšími vlivy (UV záření, chemikálie) nebo pro dosažení lepšího vzhledu. Výtisk je nejprve očištěn a odmaštěn.

Je vhodné začít základovou vrstvou a až poté nanášet zvolenou barvu. Nejčastěji se používají akrylové nebo olejové nátěrové hmoty. Pro nanášení lze použít štětec, airbrush nebo sprej. Po zaschnutí barvy je dobré ještě nanosenou barvu nalakovat. [38]

Chemické vyhlazování povrchu

Ke snížení drsnosti povrchu lze využít některá organická rozpouštědla, která naleptají povrch výtisku, čímž dojde k jeho vyhlazení. Zároveň je touto metodou postprocessingu dosaženo lesklého povrchu. Nejčastěji jsou tímto způsobem ošetřovány výtisky z ABS a ASA. [39]

Výtisky z ABS/ASA se většinou vyhlazují acetonem, jelikož jde o běžně dostupné rozpouštědlo. Na součást můžeme chemikálii přímo nanést štětečkem (v několika vrstvách) nebo ji lze do rozpouštědla přímo ponořit (obvykle na 5 až 10 sekund). Také se využívá vyhlazování v parách, jehož princip je následovný: výtisk uložíme do uzavíratelné nádoby, kterou předtím vystelíme kapesníky, molitanem apod. namočenými v acetonu. Nádobu pak uzavřeme. Aceton se pozvolna odpařuje a jeho páry naleptávají povrch výtisku, a tak dochází k jeho vyhlazení. Vypařování acetonu, a tedy zkrácení doby vyhlazování, můžeme případně urychlit zahříváním nádoby. Čas, po který necháme aceton, resp. jeho páry působit, závisí na velikosti tištěné součásti. Součást musíme sledovat, abychom zabránili její případné degradaci. Čím déle totiž bude rozpouštědlo působit, tím více bude součást naleptána a tím spíše dojde k její degradaci. [6] [40] [41]

PETG lze obdobným způsobem vyhlazovat pomocí dichlormethanu. Dichlormethan je však vysoce toxická chemikálie a není běžně dostupná. Při práci s touto chemikálií je nutné dbát zvýšené bezpečnosti (ochrana pokožky, očí a dýchacích cest). [39]

Co se týče vůbec nejpoužívanějšího materiálu pro polymerní 3D tisk, PLA se chemicky vyhlazuje velmi těžko. Použití acetonu je vyloučené, jelikož téměř okamžitě dochází k degradaci součásti. Některé zdroje uvádí možnost použití chloroformu. Ten je však extrémně toxický a proto by s ním měli pracovat pouze vyškolené osoby. Pro PLA se ale nabízí vyhladit povrch tekutým resinem. Resin nanášíme štětečkem a poté každou jednotlivou nanosenou vrstvu necháme vytvrdit pomocí zdroje UV záření. Vzniklá vrstva zacelí póry, zpevní a vyhladí povrch výtisku. [42]

Pokovování

Plasty se pokovují většinou z estetických důvodů – komponenty získají hezký kovový vzhled. Právě dekorativní pokovování plastových dílů se hojně uplatňuje v automobilovém průmyslu (mřížky chladičů, loga, emblémy). Ovšem pokovování s sebou přináší i zlepšení mechanických vlastností, zvýšení korozní a chemické odolnosti, ořezuvzdornosti, snížení navlhavosti aj. [43] [44]

Rozlišujeme tři metody: pokovování chemické, galvanické a ve vakuu.

Chemické pokovování probíhá bez vnějšího zdroje elektrického proudu. Plastová součást a povlakový kov (nejčastěji měď, nikl, popř. stříbro) jsou ponořeny do roztoku soli. Působením redukčního činidla dochází k vylučování kovu na povrch součásti. [45]

Galvanické (elektrolytické) pokovování funguje na principu elektrolýzy. Plastová součást musí být nejprve chemicky pokovena, aby došlo k vytvoření základní vodivé vrstvy. Následně jsou součást a povlakový kov (např. měď, zinek) ponořeny do elektrolytu, kdy kov je zapojen jako anoda a součást jako katoda. Elektrody jsou připojeny ke stejnosměrnému zdroji napětí. Po průchodu elektrického proudu na anodě dochází k oxidaci (anoda se po čase rozpustí) a na katodě k redukci. [45]

Principem pokovování ve vakuu je nanášení tenké vrstvičky kovu (např. hliník, chrom) na plastovou součást napařováním za velmi nízkých tlaků (řádově $10^{-5} - 10^{-3}$ Pa). Vzhledem k tomu, že proces probíhá ve vakuu, dochází k odpařování kovu za nižších teplot, čímž se eliminuje riziko tepelné degradace materiálu. [45] [46]

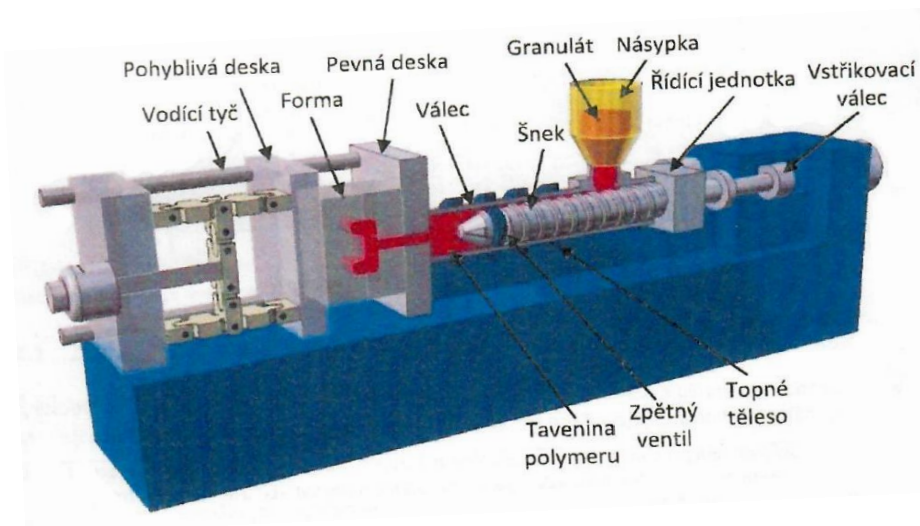
3.6 Technologie vstřikování plastů

Technologie vstřikování je cyklický proces spočívající v dopravování roztaveného plastu do formy, kde ztuhne. Mezinárodní norma ČSN EN ISO 472:2013 definuje vstřikování následovně: „Vstřikování (injection moulding) je proces tváření materiálu jeho vstřikováním pod tlakem ze zahřátého válce přes vtok (rozdávěcí kanálek, vtokové ústí) do dutiny uzavřené formy.“ [47] [48]

Plast (používají se termoplasty i reaktoplasty) je ve formě granulátu dopraven do násypky, kde se granulát smísí s barvivem a dalšími aditivy. Ve válci je granulát roztaven (zdrojem tepla jsou topná tělesa a samotný pohyb šneku) a axiálním pohybem šneku tlačěn směrem ke vtokovému ústí formy. Tavenina vyplní dutinu formy a nechá se zchladnout. Po ztuhnutí se forma otevře a výrobek je vyhozen vyhazovacím systémem nebo odebrán robotem. [47] [48]

Celý proces lze rozdělit do čtyř fází:

- 1) Zavírání formy – pohyblivá část formy je uzavírací jednotkou přitlačena k pevné části formy, aby bylo zabráněno otevření formy během vstřikování taveniny
- 2) Vstřikování – tavenina je pod tlakem, způsobeného axiálním pohybem šneku, vstřikována do dutiny formy
- 3) Chlazení – tavenina se ve formě ochlazuje, dokud plast neztuhne. Vstřikovací jednotka během tuhnutí ještě vytváří tzv. dotlak. Při ochlazování se plast smršťuje (zmenšuje objem). Aby se zabránilo vzniku propadlin a staženin, je do formy pod malým tlakem vstřikována další tavenina, která kompenzuje objemové změny.
- 4) Otevření formy a vyjmutí výrobku [48]



Obrázek 12 - schéma vstřikovacího stroje [48]

Vstřikování je v průmyslové praxi jednou z nejvíce užívaných technologií. Technologie je oblíbená zejména díky nízkým nákladům na výrobu jednoho kusu při výrobě velkých objemů (velkosériová výroba). Další značnou výhodou vstřikování je možnost výroby členitých tvarů o velkých rozměrech (v současné době lze zhotovit díly o velikosti 3,5 x 2,5 m). Navíc škála materiálů je velmi široká. [48] [49]

Největší omezení technologie vstřikování je dlouhá doba návratnosti investic - minimálně několik týdnů. Počáteční náklady jsou vloženy na výrobu formy a bývají vysoké (řádově stovky tisíc korun). Stejně tak doba dodání výrobku na trh trvá několik týdnů. Minusem je také nemožnost jakékoli úpravy designu, pokud plně nevyhovuje - vyžadovalo by to výrobu nové formy. Dále je důležité poznamenat, že i když vstřikolis umožňuje výrobu tvarově členitých součástí, nikde nebudeme schopni touto metodou vyrobit komponenty s tak složitou geometrií, jako je tomu u 3D tisku. U vstřikování nás totiž omezuje skutečnost, že součást musí být možno z formy vyjmout. [48] [49]

3.6.1 Materiály pro vstřikolis

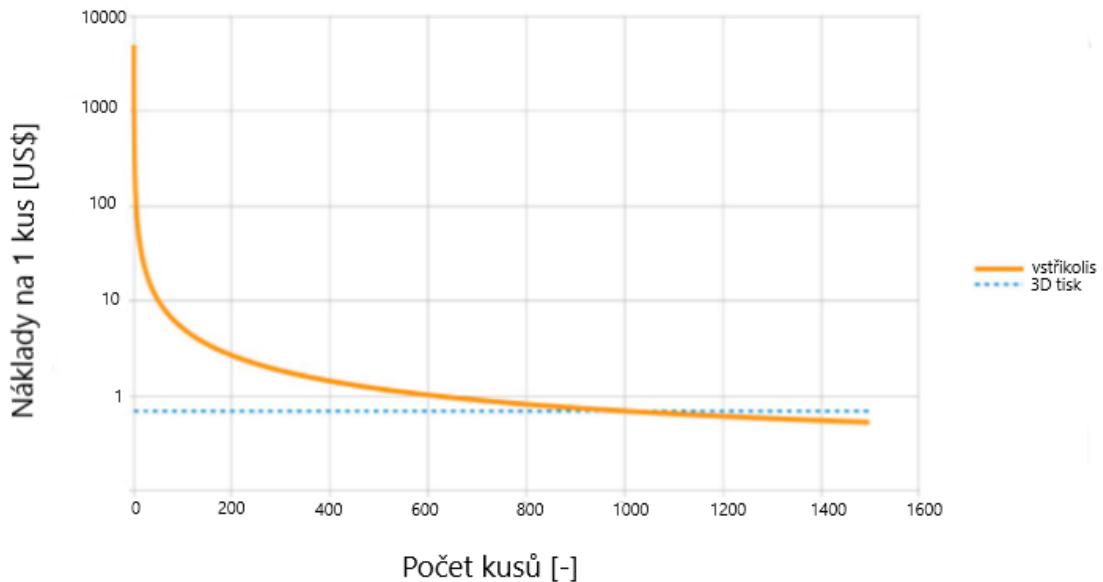
Pro vstřikování se používají termoplasty i reaktoplasty. Termoplasty při zahřívání přechází do plastického stavu (měknou). Po ochlazení lze termoplasty zahříváním znovu roztavit a tvářet. Patří sem PE (polyetylen), PP (polypropylen), PS (polystyren), ABS (akrylonitrilbutadienstyren), PA (nylon), PC (polykarbonát). Naproti tomu reaktoplasty nelze tavit opakovaně. Při opětovném zahřívání dojde k chemické reakci, která má za následek vznik zesíťované struktury (vytvrzení), jenž brání dalšímu tavení a tvarování. Nevytvrzené reaktoplasty jsou označovány jako pryskyřice - např. PF (fenol-formaldehydová pryskyřice), EP (epoxidová pryskyřice), UP (polyesterová pryskyřice). [48] [50]

3.7 Porovnání vstřikolisu a polymerního 3D tisku

Mezi dnešními výrobci jsou jak polymerní 3D tisk, tak vstřikování plastů životaschopnými možnostmi pro výrobu složitých polymerních komponent. [51]

Porovnáme-li vstřikování s aditivními technologiemi z hlediska nákladů, tak pořizovací náklady jsou u 3D tisku mnohem nižší než u vstřikolisu, kde se ceny forem pohybují řádově ve stovkách tisíc korun v závislosti na jejich velikosti a složitosti. Náklady na výrobu jednoho dílu vyrobeného vstřikováním jsou cca 5x až 6x nižší než u 3D tisku, avšak náklady 3D tištěných dílů zůstávají konstantní a v podstatě není potřeba žádná počáteční investice. Naopak u vstřikování musíme počítat s vysokým počátečním kapitálem. Jak lze vidět v grafu níže, 3D tisk se cenově vyplácí především v malosériové výrobě do cca 1000 kusů. Právě při vyrobení kolem 1000 kusů se totiž náklady výtisků a 3D výtisků vyrovnávají. [51] [52]

Srovnání nákladů 3D tisku a vstřikolisu



Graf 1 - srovnání nákladů 3D tisku a vstřikolisu (upraveno) [52]

Jednou z věcí, které ovlivňuje náklady 3D tisku je následná apretace. Způsob apretace, popřípadě její strojní provedení (ruční vs. plná automatizace) se odvíjí od velikosti série a požadavku na finální povrch. Samozřejmě, že čím více strojů zapojíme do následného postprocessingu 3D tištěného dílu, tím více vzroste i jeho cena. To si můžeme předvést na modelové situaci: mějme tiskovou farmu, na které tiskneme například florbalové čepele. Při malé sérii (jednotky kusů) můžeme čepele doopracovávat ručně - tedy odlámat podpory a zabrousit povrch, přičemž cena nijak zásadně nevzroste, jelikož nebylo třeba použít žádný specializovaný stroj. Pokud ovšem budeme tisknout stejnou sérii, ale s požadavkem na dokonale hladký povrch, kterého už nejsme schopni ručním broušením dosáhnout, budeme nuceni do postprocessingu zapojit nějakou brusku se specializovaným nástrojem. Zapojením brusky do postprocessingu se zvýší celkové náklady na sérii, a tudíž i cena jednotlivých výtisků bude vyšší. Proto je potřeba sérii zvětšit, aby se se bruska vyplatila. Zároveň použitím brusky dojde i k úspoře času.

Velkou výhodou 3D tisku je, že design součásti lze měnit během výroby prakticky kdykoli, zatímco u vstřikování změna designu znamená drahou výrobu další formy. Zároveň jsme 3D tiskem schopni vyrobit součásti se složitější geometrií, jelikož nás neomezuje forma - u vstřikování musíme kalkulovat se skutečností, že součást bude potřeba po ztuhnutí z formy vyjmout. [52]

Díky 3D tisku má výrobce možnost dostat produkt na trh mnohem rychleji než že tomu u vstřikování, kde výroba formy, nastavení a vyladění lisu zaberou mnoho času. [52]

Z pohledu produkce odpadního materiálu, je zde jednoznačně lepší volbou vstřikování. Dalším plusem vstřikování je obecně dosažení větší únavové pevnosti než u 3D tištěných dílů. Vzhledem k principu 3D tisku, spočívajícím v nanášení materiálu vrstvu po vrstvě, dochází na součásti ke vzniku vrubů. Vruby jsou iniciátorem pro šíření trhlin, které snižují mez únavy součásti. [3]

4 Praktická část

4.1 Florbalová čepel

Nejdůležitějším vybavením hráče v poli je hokejka, skládající se z hole (shaft), čepel a omotávky. Čepel je nasazená a upevněná dvěma šroubky na spodním konci hole. Florbalové čepel lze rozdělit na základě několika parametrů, které jsou pro hráče důležité, jelikož na jejich základě si volí čepel tak, aby jim co nejvíce vyhovovala pro jejich herní styl.

4.1.1 Základní rozdělení čepelí

Florbalové čepel můžeme rozdělit podle výrobce, kdy každá značka má svůj charakteristický design, který se od ostatních výrobců mírně odlišuje. Mezi nejznámější výrobce florbalových čepel patří Unihoc, Zone, OxDog, Exel, Salming, FatPipe a AreX.

Důležitým určujícím parametrem je tvrdost čepel, kdy rozlišujeme tři skupiny: měkké, středně tvrdé a tvrdé. S měkkou čepelí má hráč lepší cit pro balonek, jsou tedy ideální pro stickhandling (technika hole, individuální dovednosti). Jejich nevýhodou je slabší střelba (míček letí nižší rychlostí) a nižší únavová pevnost. Měkké čepel jsou nejvíce užívány v mládežnických kategoriích. Naopak pomocí tvrdé čepel dokážeme vyprodukovat velmi prudkou střelu, jsou vhodné především pro střelbu přiklepem/golfem. Nicméně stickhandling je horší, balonek více odskakuje. Ideální je tedy středně tvrdá čepel, která vyvažuje pozitiva i negativa tvrdé a měkké čepel. Středně tvrdé čepel jsou mezi hráči zastoupeny nejvíce. Tvrdost je dána materiálem, z něhož je čepel zhotovena. Čepel se vyrábí ze tří základních skupin materiálů – PA, PE, PP. Čepel z uvedených materiálů budou podrobněji popsány v kapitole 4.1.3.

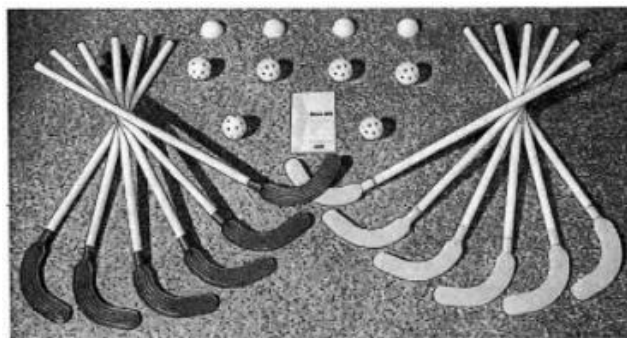
Čepel lze také rozdělit dle zakřivení na zcela rovné (radius 0 mm), klasické a velmi zakřivené (tzv. freestyle čepel). Zakřivení může být nalevo nebo napravo. IFF definuje maximální povolenou hodnotu zakřivení čepelí, s nimiž lze hrát oficiální soutěže, jako 12 mm. Vyšší hodnotu zakřivení mají freestylevé čepel, které nejsou určeny pro zápasy, ale pouze pro učení „působivých triků“. [53]



Obrázek 13 - maximální povolené zakřivení čepel dle IFF [53]

4.1.2 Historický vývoj čepelí

První florbalové hole a tedy i čepel se objevily v USA a Kanadě koncem 50. let minulého století, kdy byl florbal vynalezen. Vyráběla je americká firma Cosom vstřikováním polyamidu. Oproti dnešním čepelím byl jejich tvar odlišný, byly rovné a měly značně vyšší hmotnost, než mají dnešní čepel - byly totiž plné. [54]



Obrázek 14 - plné čepele Cosom [55]

V roce 1986 byl již florbal v Evropě velmi rozšířený, a proto vznikla Mezinárodní florbalová federace (IFF). To byl z hlediska dalšího vývoje florbalu významný krok, jelikož se od té doby dostávalo tomuto sportu více finanční podpory, a tak se mohla vyvíjet nejen hra, ale i florbalové vybavení. V té době se už plné čepele prakticky nevyskytovaly. Nahradily je lehčí čepele s žebrováním. Čepele se sice odlehčovaly, ale ještě na přelomu milénia byly u hráčů k vidění většinou zcela rovné, nebo jen mírně zakřivené čepele bez jakéhokoli vybrání.



Obrázek 15 - rovné čepele bez vybrání (upraveno) [56]

I dnes pokračuje trend odlehčování čepelí a vyvíjení nových designů. Hmotnost většiny dnešních čepelí se pohybuje mezi cca 80 až 100 g. Vyrábí se většinou z PE nebo PP, PA v současné době spíše ustupuje do pozadí. [57]



Obrázek 16 - příklad moderní čepelí (OxDog Optilight) [58]

4.1.3 Materiály florbalových čepelí

Současné florbalové čepele se, stejně jako jejich předchůdci, vyrábí vstřikováním termoplastů. Celý proces zhotovení jednoho kusu trvá asi 60 sekund. Nejvíce čepelí se vyrábí z PE, ale poslední dobou se začíná stále více uplatňovat PP. Naopak PA v současné době spíše ustupuje do pozadí – vyrábí se z něj většinou rekreační čepele pro školní sety florbalových holí. [59]

PA (polyamid) je semikrystalický termoplast, který se vyznačuje poměrně vysokou pevností, má vysokou teplotu tání a dlouhou životnost. PA je odolný vůči otěru a nepolárním rozpouštědlům, v kyselinách o vyšších koncentracích se rozpouští. Polyamid má relativně silnou tendenci k navlhání. Čím vyšší procento vody obsahují, tím více jsou houževnaté, dochází však ke snížení pevnosti a tvrdosti. [60]

Ještě před cca patnácti lety byl PA nejvíce zastoupeným materiálem pro výrobu florbalových čepelí. Dnes už se pro certifikované čepele vyšší kvality téměř nepoužívá, přestože je velmi odolný vůči stárnutí. Pro hráče je hlavním problémem tohoto materiálu fakt, že PA čepele jsou ve srovnání s čepelemi z PE a PP značně těžší. Další nevýhodou z hráčského hlediska je poměrně tvrdý dotyk s míčkem (míček dost odskakuje). [59]

PE (polyetylen) je jedním z nejběžnějších a nejpoužívanějších plastů. Vlastnosti PE se do značné míry odvíjí od způsobu polymerizace, která má vliv na molekulární hustotu, strukturu a krystalinitu. Obecně lze říct, že PE má dobrou houževnatost, je odolný vůči působení vody, kyselin i zásad. V závislosti na hustotě rozlišujeme dva základní druhy - HDPE (High Density PE) a LDPE (Low Density PE). HDPE mají vyšší pevnost, tuhost a tvrdost, avšak nižší tažnost a houževnatost než LDPE. [61] [62]

PE, konkrétně HDPE, je vůbec nejpoužívanějším materiálem pro výrobu florbalových čepelí. Tyto čepele se vyznačují dobrým přenosem energie do míčku, což má za následek prudší střelu, dále výbornými kluznými vlastnostmi a možností snadné tvarovatelnosti (čepel si může každý hráč, za předpokladu splnění normy dle IFF, přiznat při teplotě cca 90 °C dle svých osobních preferencí). [63]

PP (polypropylen) je semikrystalický termoplast, svými vlastnostmi podobný polyetylenu. Ve srovnání s PE má nižší hustotu, vyšší teplotu tavení a tvrdost. Tuhost a pevnost odpovídá zhruba HDPE. Stejně jako PE je i PP odolný vůči kyselinám a zásadám. [61]

Poslední dobou jsou florbalové čepele z PP stále oblíbenější. Manipulace s míčkem je v porovnání s čepelemi z PE snazší - míček se tolik neodráží. Další výhodou je nižší hmotnost. Na druhou stranu přenos energie do balonku je horší, tzn. střelba je slabší. Mínusem je také vyšší hrubost tohoto materiálu, v důsledku čehož se čepel na gumovém povrchu trochu zadrhává. [59] [63]

Firmy OxDog a Unihoc zvyšují tuhost čepelí přidáním karbonu, resp. titanu. Některé varianty čepelí OxDog mají malý karbonový plát, který by dle výrobce měl přinést vyšší tuhost a minimalizovat kroucení. Teorie je taková, že s menším prohnutím čepele se ztratí méně energie a střela bude mít vyšší rychlost. Unihoc produkuje čepele s označením PP-Ti, u nichž deklaruje vyšší tuhost, kterou hráč ocení během střelby při zachování „měkkého dotyku“ charakteristického pro polypropylenové čepele. [64] [65]

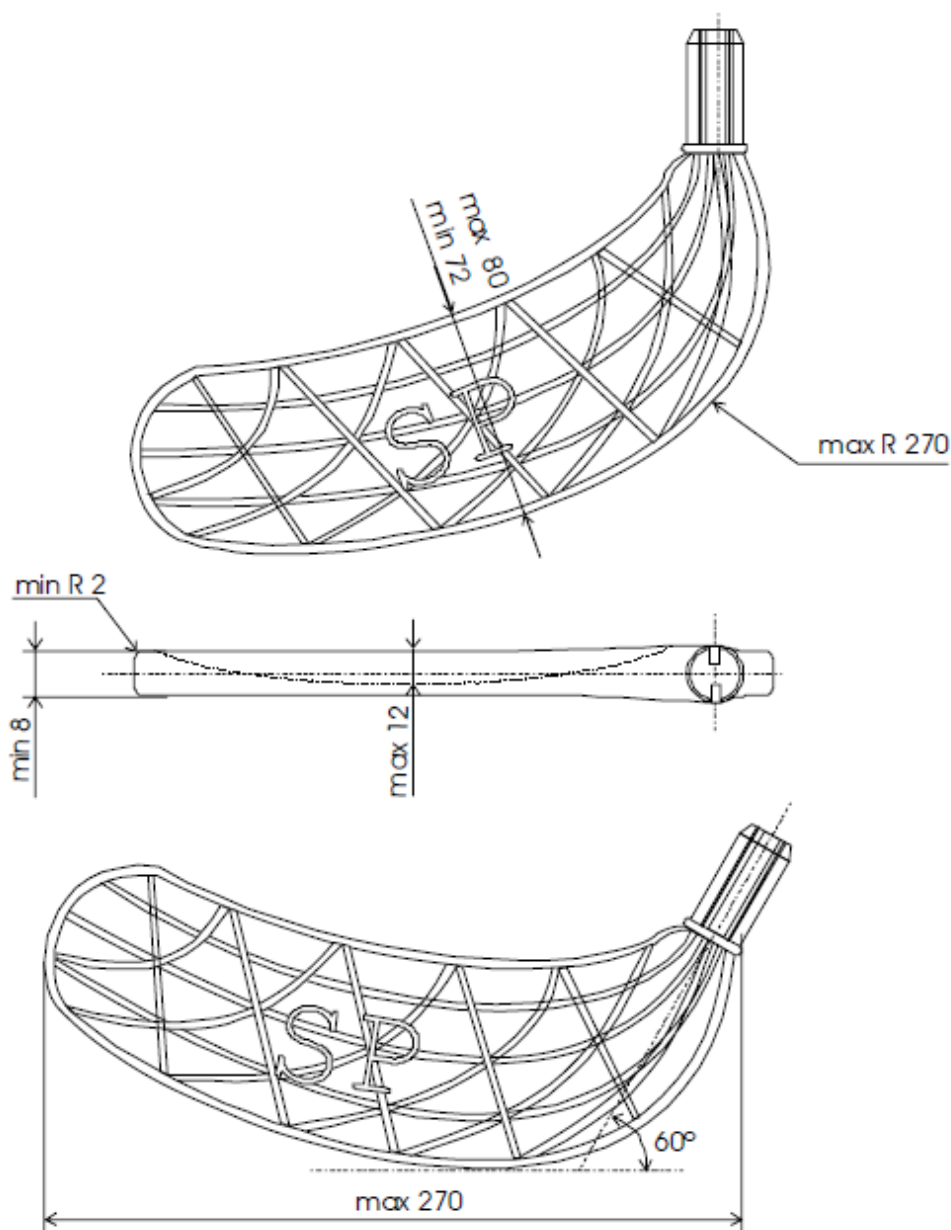
4.2 Požadavky na čepel

Na florbalové vybavení existuje mnoho požadavků - ať už ze strany Mezinárodní florbalové federace (IFF) nebo ze strany samotných hráčů.

4.2.1 Objektivní požadavky dle IFF

IFF každý rok aktualizuje tzv. Material Regulations, tedy soubor kritérií, které musí florbalové vybavení splňovat, aby mohlo být certifikováno, a tím pádem užíváno v oficiálních soutěžích. Dle IFF musí každá certifikovaná florbalová čepel splňovat následující normy: rozměry, houževnatost, torzi, povolenou hodnotu obarvování hracího povrchu. [53]

Rozměry čepel jsou zobrazeny níže (Obrázek 17):



Obrázek 17 - povolené rozměry florbalové čepel dle IFF [53]

V oblasti testování rázové houževnatosti a torze, IFF nezveřejňuje konkrétní hodnoty, které musí čepel zvládnout. V souboru Material Regulations je uvedeno pouze to, že na testované čepeli nesmí být žádné viditelné praskliny. [53]

Zbarvení na hrací ploše způsobené čepelí by dle IFF nemělo být větší než 10 % a mělo by být snadné odstranit ho pomocí papírových utěrek a vody. [53]

4.2.2 Subjektivní požadavky ze strany hráče

Pro hráče je výběr florbalové čepelí velmi důležitý. Hráč na čepeli subjektivně posuzuje především tvar (zakřivení, vybrání, délku od špičky k patce), tvrdost, drsnost spodní hrany.

Co se týče zakřivení a vybrání čepelí, volí hráči většinou „zlatou střední cestu“. Příliš rovné čepelí jsou horší pro manipulaci s míčkem, ale zase s nimi jde velmi dobře střílet i backhandovou (opačnou, zadní) stranou čepelí. Naopak čepelí, které mají velké zakřivení, jsou sice výborné pro ovládání balonku, ale střelba není příliš přesná. Z výše uvedených důvodů hráči volí nejčastěji zakřivení cca 8 mm.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.1.1, z hlediska tvrdosti rozlišujeme čepelí měkké, středně tvrdé a tvrdé. I v tomto hledisku hráči volí především středně tvrdé čepelí - tedy optimum mezi razantní střelbou, která je charakteristická pro tvrdé čepelí, a cítem pro míček, jímž se vyznačují čepelí měkké. Obecně lze říct, že s tvrdými čepelí hrají spíše obránci, jelikož oproti útočníkům častěji střílí z větších vzdáleností.

Drsnost spodní hrany čepelí je pro řadu hráčů důležitým parametrem. PE čepelí jsou hladší, oproti PP čepelím lépe kloužou po povrchu. To je v případě tarketu (gumového povrchu) samozřejmě žádoucí, nicméně na parketách to bývá spíše na škodu – tady se více uplatní PP čepelí, popř. PE čepelí s vroubkou na spodní hraně. PP čepelí jsou tedy obecně vhodnější pro hraní na parketách a pro střelbu příklepem. PE čepelí jsou výbornou volbou pro střelbu tahem a obecně pro hraní na tarketu.

4.3 Návrh modelu, nastavení parametrů ve sliceru a tisk

3D model čepelí byl vytvářen v programu Fusion 360. Základní tvar vycházel z čepelí značky OxDog Avox. Pro zachování (zachycení) základní geometrie florbalové čepelí, která musí splňovat normy IFF, byla použita fotografie konvenčně vyrobené čepelí OxDog Avox a funkce „Spline“. Velikost fotografie byla samozřejmě nakalibrována na reálnou velikost čepelí. Tento postup umožnil vytvořit model 1:1, na němž byly provedeny další úpravy. Prohnutí bylo řešeno pomocí funkce „Loft“. Následně bylo domodelováno uchycení na hůl. Takto byly vytvořeny celkem čtyři prototypy.

Jako materiál byl zvolen PETG a „blend“ PC-ABS, jelikož jejich mechanické vlastnosti jsou podobné materiálům HDPE a PP, ze kterých jsou vyráběny konvenční florbalové čepelí.

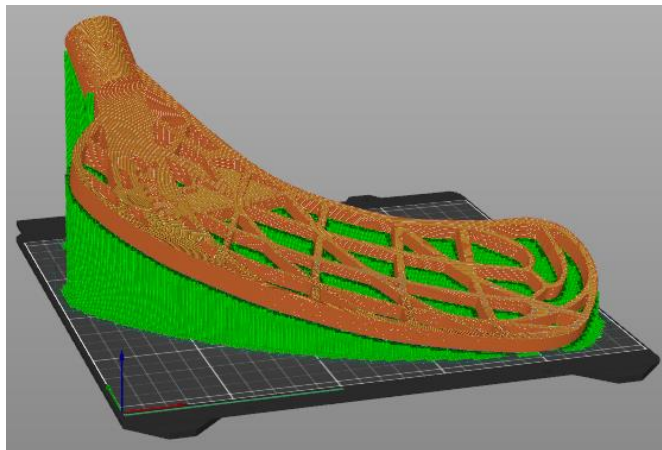
Prototypy č. 1 a č. 3 byly tištěny z materiálu PETG na tiskárně Prusa MK3S. Tiskové parametry těchto prototypů byly nastavovány v programu PrusaSlicer. Prototypy č. 2 a č.

4 byly vyhotoveny z PC-ABS na tiskárně Stratasys F370, tiskové parametry byly nastavovány v programu GrabCAD.



Obrázek 18 - tiskárny Stratasys F370 (vlevo) a Prusa MK3S (vpravo) [66] [67]

Při nastavování tiskových parametrů bylo důležité zvolit vhodnou orientaci modelu, hustotu a typ výplně, počet perimetrů, výšku vrstvy a teplotu tisku. Modely bylo potřeba orientovat co nejvíce naplocho, kvůli soudržnosti mezi vrstvami. Vzhledem ke směru namáhání čepel při střelbě je vhodné zařídit co největší plochu vrstev, aby při střelbě nedošlo k porušení integrity v ose, v níž jsou vrstvy kladeny, a tedy následnému prasknutí po vrstvách.

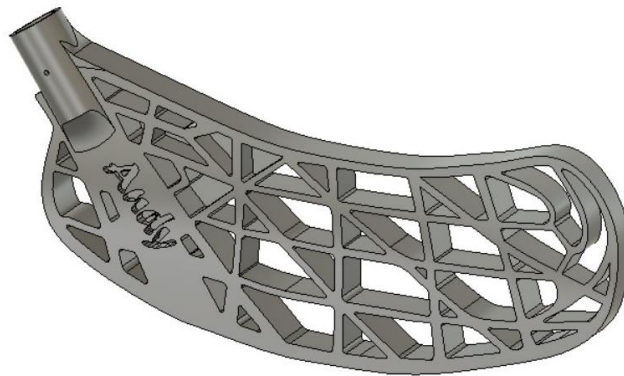


Obrázek 19 - ukázka orientace modelu čepel

Typ a hustota výplně byla volena tak, aby měl výtisk co nejlepší mechanické vlastnosti (pevnost) a zároveň neměl příliš vysokou hmotnost. Výška vrstvy a tloušťka stěny se odvíjely od průměru trysky, který činil 0,4 mm. Tato velikost trysky byla zvolena, jelikož je nejvýhodnější z hlediska poměru kvality povrchu a doby tisku. Tisková teplota (teplota trysky) byla dána materiálem (230 °C pro PETG, 270 °C pro PC-ABS). Detailní nastavení tiskových parametrů je uvedeno u každého prototypu v následující podkapitole.

4.3.1 Prototyp č. 1

Typ čepel Avox posloužil jako předloha pro vytvoření prvního prototypu, u něhož jsem vyztužila špičku, aby více vyhovovala mému hernímu stylu. Konvenčně vyrobená čepel OxDog Avox v důsledku mého herního stylu, který se vyznačuje častou střelbou přes špičku čepel (střelba zápěstím), několikrát za sezónu na stejném místě praskne. Prasklina sama o sobě není takovým problémem, protože poškozenou čepel lze jednoduše vyměnit. Problémem je ale fakt, že ještě než se objeví prasklina, se na špičce čepel projevuje stále se zvětšující deformace - materiál se stává plastickým, čepel měkne, což negativně ovlivňuje razanci i přesnost střelby. Cílem prvního prototypu bylo vyztužení tohoto kritického místa, aby se předešlo brzkému (rychlému) rozvoji deformace čepel a zároveň aby se při střelbě lépe přenášela energie do míčku. Jako materiál byl zvolen PETG.



Obrázek 20 - model prototypu č. 1

Vedle vyztužení špičky, které bylo hlavním cílem prototypu č.1, bylo při návrhu nutné počítat s nasazováním čepel na hůl. To se standardně provádí za tepla, kdy se čepel nahřeje a v důsledku toho materiál změkne a jde jednoduše nasadit na hůl. Tento postup u PETG popř. PC-ABS, z nichž byly všechny prototypy tisknuty, nelze aplikovat vzhledem k teplotě tváření, která je oproti PE a PP výrazně vyšší. Z tohoto důvodu bylo potřeba při návrhu nepatrně zvětšit vstupní otvor a zesílit jeho stěnu, aby při nasouvání za studena toto místo neprasklo.

Tabulka 7 - tiskové parametry prototypu č. 1

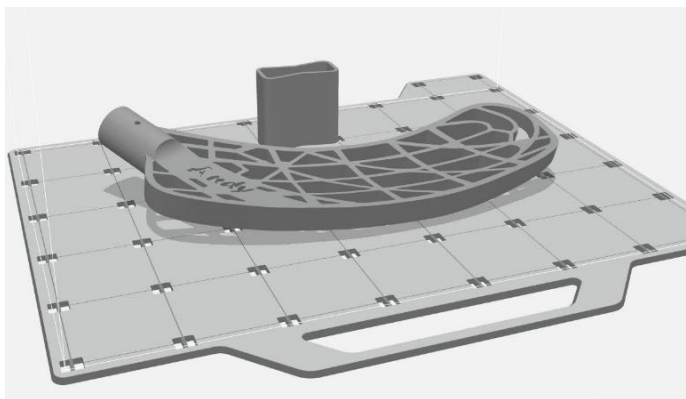
Tiskové parametry - prototyp č. 1	
Teplota tisku (tryska) [°C]	230
Typ výplně	Gyroid
Hustota výplně [%]	20
Tloušťka stěny [mm]	1,2
Průměr trysky [mm]	0,4
Výška vrstvy [mm]	0,2



Obrázek 21 - prototyp č. 1 bezprostředně po vytisknutí

4.3.2 Prototyp č. 2

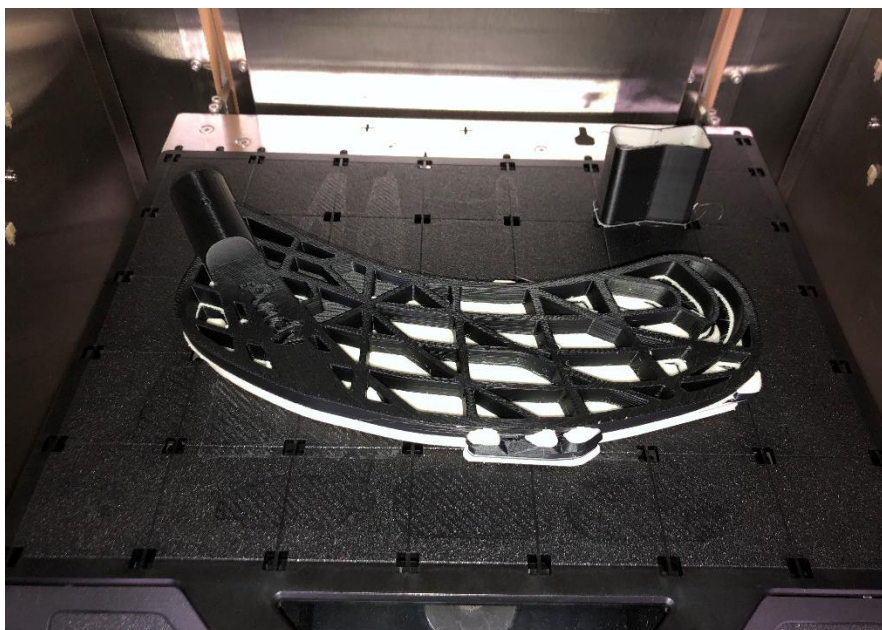
Prototyp č. 2 má stejnou geometrii (je designově identický) jako prototyp č. 1, pouze byl použit odlišný materiál, a to PC-ABS. Účelem bylo zjistit, jak zvolený materiál ovlivňuje práci s míčkem, aby případně bylo možné vysledovat, který materiál se pro florbalovou čepel jeví jako vhodnější.



Obrázek 22 - ukázka modelu v prostředí GrabCAD (prototyp č. 2)

Tabulka 8 - tiskové parametry prototypu č. 2

Tiskové parametry - prototyp č. 2	
Teplota tisku (tryska) [°C]	270
Typ výplně	Hexagram
Hustota výplně [%]	38
Tloušťka stěny [mm]	1,32
Průměr trysky [mm]	0,4
Výška vrstvy [mm]	0,18



Obrázek 23 - prototyp č. 2 bezprostředně po vytisknutí

4.3.3 Prototyp č. 3

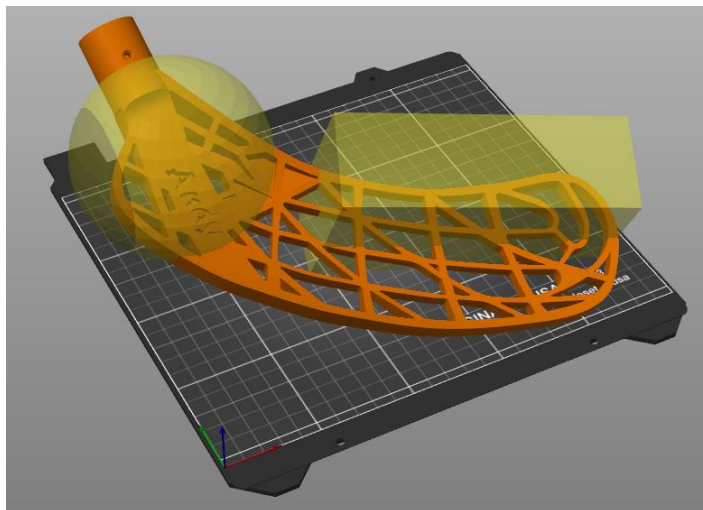
U prvních dvou prototypů byla problémem vyšší hmotnost (134 g). Z tohoto důvodu jsem se u následujících prototypů zaměřila na snížení hmotnosti při zachování živostnosti/pevnosti a co nejoptimálnějších herních vlastností.

Prototypu č. 3 byl zeštíhlen a současně bylo mírně zvětšeno zakřivení. Aby nedošlo ke snížení pevnosti, byla v PrusaSliceru použita funkce Modifikátory. Použitím modifikátorů byla v oblasti patky a otvoru k uchycení na hůl zvýšena hustota výplně na 50%. Naopak v oblasti horní hrany čepele byla hodnota hustoty výplně snížena na 15%. Zbylé části čepele měly nastavenou hustotu 20%. Výše uvedeným postupem bylo dosaženo výrazného snížení hmotnosti (na 98 g) čepele při současném zachování mechanických vlastností.



Obrázek 24 - model prototypu č. 3

Použití modifikátorů je vidět na obrázku níže (Obrázek 25). Modifikátor „koule“ má nastavenou vyšší hustotu výplně (50%), jelikož oblast patky a uchycení na hůl musí mít vyšší pevnost. Modifikátor „kostka“ má naopak nastavenou nižší hustotu výplně, protože horní hrana čepele nemusí být vzhledem k nižšímu namáhání tolik pevná.



Obrázek 25 - použití modifikátorů (PrusaSlicer)

Tabulka 9 - tiskové parametry prototypu č. 3

Tiskové parametry - prototyp č. 3	
Teplota tisku (tryska) [°C]	230
Typ výplně	Gyroid
Hustota výplně [%]	20
Hustota výplně (modifikátory) [%]	50/15
Tloušťka stěny [mm]	1,2
Průměr trysky [mm]	0,4
Výška vrstvy [mm]	0,2



Obrázek 26 - prototyp č. 3 bezprostředně po vytisknutí

4.3.4 Prototyp č. 4

Jelikož čepel z materiálu PC-ABS byla tištěna na tiskárně Stratasys, která pracuje s programem GrabCAD, nebylo možné ke snížení hmotnosti použít modifikátory – tento program na rozdíl od PrusaSliceru s nimi nedisponuje. Snížení hmotnosti bylo tedy u prototypu č. 4 řešeno změnou designu (hustší výplet u patky a na spodní hraně včetně špičky a naopak méně materiálu na horní hraně čepel). Zároveň byla oproti prototypu č. 2 snížena hustota výplně o 3 %. Aplikace výše uvedeného postupu vedla ke snížení hmotnosti (115g) a zároveň byla zachována pevnost čepel.



Obrázek 27 - model prototypu č. 4

Tabulka 10 - tiskové parametry prototypu č. 4

Tiskové parametry - prototyp č. 4	
Teplota tisku (tryska) [°C]	270
Typ výplně	Hexagram
Hustota výplně [%]	38
Tloušťka stěny [mm]	1,32
Průměr trysky [mm]	0,4
Výška vrstvy [mm]	0,18



Obrázek 28 - prototyp č. 4 bezprostředně po vytisknutí

4.4 Postprocessing

Postprocessing spočíval v odstranění podpůrné konstrukce. U výtisků z PETG (prototypy č. 1 a č. 3), tištěných na tiskárně Prusa MK3S, byly podpory odstraněny mechanicky za použití kleští a lámacího nože. Následně byly vytisknuté čepele broušeny za mokra smirkovým papírem, aby došlo k odstranění zbytků podpor a vyhlazení povrchu.

Podpory u čepelí tištěných na tiskárně Stratasys F370 (prototypy č. 2 a č. 4) byly odstraňovány chemicky. Tiskárna Stratasys F370 má dvě tiskové hlavy - jedna hlava tiskne podpůrnou konstrukci a druhá vlastní výrobek, přičemž materiál podpůrné konstrukce je odlišný od materiálu vlastního výrobku a lze jej rozpustit v rozpouštědle. Materiál podpor QSR (označení výrobce) byl rozpuštěn v lázni hydroxidu sodného. Po rozpuštění podpor následoval oplach a jemné mechanické dočištění.



Obrázek 29 - rozpuštění podpor v lázni hydroxidu sodného



Obrázek 30 - ruční broušení (za mokra)



Obrázek 31 - prototypové čepele po postprocessingu

4.5 Nasazení na hůl

Před nasazením byly konce holí i otvory v čepelích důkladně očištěny. Vytisknuté čepele byly na hole nasazovány za studena za použití přiměřené síly horních končetin. Následně došlo k uchycení dvěma šroubky.

5 Testování prototypů a vyhodnocení

Čepele byly testovány pěti vybranými hráčkami Extraligy žen, přičemž hráčky na škále 1-10 (1 - nejnižší známka, 10 - nejvyšší známka) hodnotily následující kritéria:

- Střelba tahem
- Střelba příklepem
- Střelba zápěstím
- Zpracování přihrávky
- Stickhandling (technika hole, individuální dovednosti)



Obrázek 32 - ukázka stickhandlingu

Vzhledem k respektování GDPR jsou hráčky označeny písmeny (A, B, C, D, E) a na fotografiích nejsou vidět jejich obličeje.

Mezi hráčky, které čepele testovaly, nebyla zařazena má osoba, aby při hodnocení byla zachována co největší objektivita.

Pro každý prototyp byla vytvořena tabulka zaznamenávající bodové hodnocení, které každá z hráček udělila jednotlivým kritériím. Počet bodů byl pro každé kritérium zprůměrován, aby bylo vidět, jak si čepele stojí v jednotlivých oblastech. Také byl vypočítán celkový průměr bodů za všechna kritéria dohromady, aby mohlo být vypracováno celkové srovnání jednotlivých prototypů. Následně bylo pro větší přehlednost vytvořeno grafické porovnání. Součástí hodnocení jsou i komentáře hráček.

5.1 Prototyp č. 1

Prototyp č. 1 se dle hráček jevil jako velmi dobrý při střelbě zápěstím a při zpracování. Hráčky se shodly, že díky tužší špičce čepele, se především při střelbě zápěstím výborně přenáší energie do míčku. Zároveň hráčky chválily měkký dotek s míčkem při zpracování. Naopak nejnižší hodnocení získalo kritériem „stickhandling“, což bylo dle slov hráček způsobené zejména vyšší hmotností čepele.

Bodové hodnocení prototypu č. 1 zobrazuje tabulka níže (Tabulka 11).

Tabulka 11 - bodové hodnocení prototypu č. 1

Číslo prototypu:		1					Průměr
Hráč:	A	B	C	D	E		
Kritérium:	Střelba tahem	9	8	7	8	8	8
	Střelba příklepem	7	9	8	7	8	7,8
	Střelba zápěstím	8	10	9	8	9	8,8
	Zpracování přihrávky	8	9	9	10	8	8,8
	Stickhandling	5	6	6	6	6	6
Celkový průměr						7,84	

Komentář hráčky A: „Čepel 1 mi velmi vyhovovala při střelbě tahem a zápěstím. Střelba příklepem byla podobná jako u mé vlastní čepele. Zpracování přihrávek bylo měkké, jemné. Naopak individuální techniku (stickhandling) hodnotím nižší známkou, jelikož byla poznat vyšší hmotnost čepele - bylo to náročné pro předloktí.“

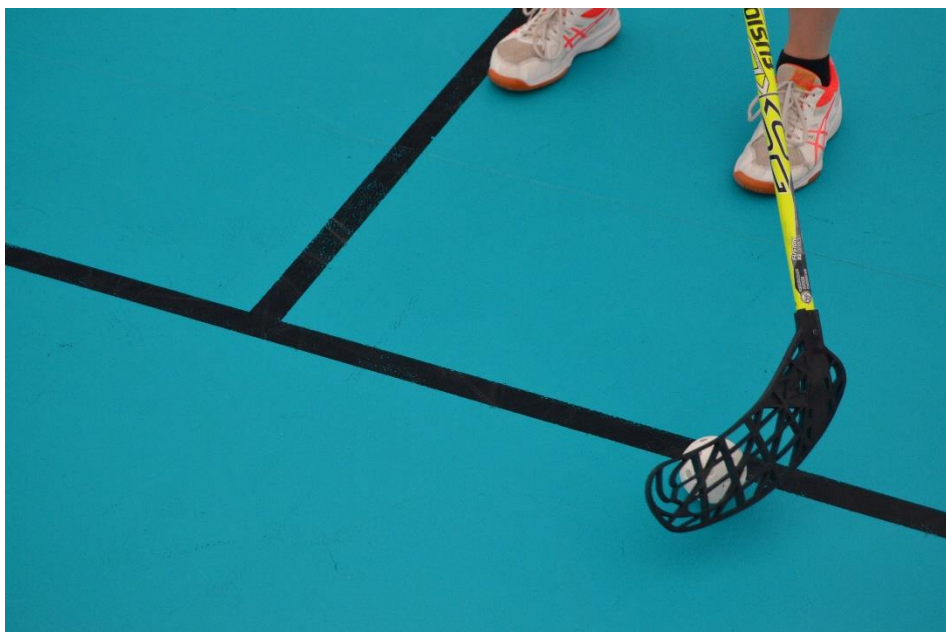
Komentář hráčky B: „S čepelí se mi výborně střílelo zápěstím. Byl zde patrný pozitivní vliv vyztužené špičky. Zároveň mě potěšil měkký dotek s míčkem při zpracování. Střelbu příklepem i tahem hodnotím také pozitivně. Stickhandling byl pro ruce vyčerpávající, protože tato čepel byla těžší než klasické čepele, na které jsem zvyklá.“

Komentář hráčky C: „První dotek při zpracování je velmi dobrý, míček neodskakuje. Střelbu zápěstím hodnotím také velmi kladně. Přišlo mi, že oproti čepeli, s kterou běžně hraji, se při střelbě zápěstím nemusím tolik snažit, abych vyslala prudkou střelu. Stickhandling byl sám o sobě dobrý, ale výsledný pocit negativně ovlivňuje vyšší hmotnost čepele.“

Komentář hráčky D: „Nejlépe hodnotím kategorii Zpracování přihrávky – první dotek s čepelí je měkký, míček od čepele neodskakuje. Tahem a zápěstím se mi z hlediska razance i přesnosti střílelo dobře. Stickhandling byl náročný, protože čepel je těžká.“

Komentář hráčky E: „Na čepeli se mi líbila hlavně 'vyrovnanost' – při střelbě se dobře přenášela energie do míčku (to bylo nejvíce poznat při střelbě zápěstím) a zároveň měla

čepel velmi jemný dotek při zpracování. Jediným negativem byla vyšší hmotnost, která při individuálních dovednostech vedla k rychlejší únavě rukou.“



Obrázek 33 - stickhandling (prototyp č. 1)

Prototyp č.1 nakonec prasknul v místě těsně pod uchycením na hůl. Nicméně k prasknutí došlo až několik dní po skončení testování. Po testování jsem ze zvědavosti prototyp zkoušela i já sama – a to při hře 3 na 3. V zápalu hry mi soupeřka nechtěně přišlápla čepel, která následkem toho praskla.



Obrázek 34 - detail prasklého místa (prototyp č. 1)

5.2 Prototyp č. 2

Prototyp č. 2 měl stejný design jako první prototyp, lišil se pouze materiálem (namísto PC-ABS byl použit PETG). Pravděpodobně z tohoto důvodu byl hráčkami z hlediska průměrného počtu bodů hodnocen podobně jako prototyp č. 1. Ve srovnání s prvním prototypem měl prototyp č. 2 vyšší bodový průměr u střelby příklepem a naopak nižší u zpracování přihrávky, což se dalo očekávat, vzhledem k tomu, že PC-ABS je oproti PETG tvrdší.

Tabulka 12 - bodové hodnocení prototypu č. 2

Číslo prototypu:		2						
Hráč:		A	B	C	D	E	Průměr	
Kritérium:	Střelba tahem	8	9	8	7	8	8	
	Střelba příklepem	8	10	9	8	9	8,8	
	Střelba zápěstím	8	9	8	9	9	8,6	
	Zpracování přihrávky	7	6	7	8	6	6,8	
	Stickhandling	5	5	6	6	6	5,6	
Celkový průměr								7,56

Komentář hráčky A: „Tato čepel je tvrdší než ta předchozí, což znamenalo o něco lepší razanci při střelbě příklepem, ale na druhou stranu zase o něco horší zpracování přihrávky. Celkový dojem je však podobný jako u čepel č. 1.“

Komentář hráčky B: „Opět výborná střelba, oproti první čepeli lepší 'příklep', což je dané vyšší tvrdostí. Ovšem kvůli vyšší tvrdosti je zpracování horší, balonek docela odskakuje. Do stickhandlingu se stejně jako v předchozím případě negativně propsala hmotnost čepel.“

Komentář hráčky C: „Čepel 2 mi obecně přišla při práci s míčkem podobná čepeli 1. Dotek při zpracování byl tvrdší, ale vyšší tvrdost čepel zase pozitivně ovlivnila rychlost míčku při střelbě (především u střelby příklepem).“

Komentář hráčky D: „Celkově docela podobné jako první čepel. Lehce lepší 'příklep' a 'zápěstí', naopak střelba tahem a zpracování trochu horší. Stickhandling byl podle mě stejný (obě čepel byly těžší než ty klasické).“

Komentář hráčky E: „'Vyrovnanost', o které jsem se zmínila u čepel 1, nacházím i zde, avšak zpracování není tak měkké jako v předchozím případě. Stejně jako u čepel 1, i zde jsou individuální dovednosti negativně ovlivněny vyšší hmotností.“



Obrázek 35 - střílení přiklepem (prototyp č. 2)



Obrázek 36 - stickhandling (prototyp č. 2)

5.3 Prototyp č. 3

Prototyp č. 3 získal nejvyšší hodnocení ze všech testovaných čepelí. Hráčky ocenily snížení hmotnosti a větší zakřivení čepel, v důsledku čehož se výrazně zlepšil stickhandling. Zároveň dle hráček díky většímu zakřivení čepel došlo i ke zlepšení přesnosti při střelbě tahem.

Tabulka 13 - bodové hodnocení prototypu č. 3

Číslo prototypu:		3					
Hráč:		A	B	C	D	E	Průměr
Kritérium:	Střelba tahem	10	10	10	9	9	9,6
	Střelba příklepem	8	8	8	9	8	8,2
	Střelba zápěstím	9	10	10	9	9	9,4
	Zpracování přihrávky	9	9	9	10	10	9,4
	Stickhandling	9	10	10	9	10	9,6
Celkový průměr							9,24

Komentář hráčky A: „Vzhledem k tomu, že tato čepel je více zakřivená, velmi dobře se mi střílelo tahem (hlavně z hlediska přesnosti). Práce s hokejkou (stickhandling) šla také velmi dobře a jsem ráda, že se podařilo dostat hmotnost této čepel na úroveň klasických čepelí.“

Komentář hráčky B: „Čepel 3 mi opravdu hodně vyhovovala. Jak střelba zápěstím, tak střelba tahem jde výborně, ať už se bavíme o přesnosti nebo tvrdosti střely. Stickhandling super díky většímu zahnutí, a především hodně pomohlo snížení hmotnosti.“

Komentář hráčky C: „Obecně mi vyhovují čepel vyššími hodnotami zakřivení, což tahle splňuje, a tak se mi s ní pracovalo skvěle. Velký progres jsem zaznamenala hlavně u přesnosti střelby tahem. Dále musím vyzdvihnout individuální techniku, kde značně pomohla nižší hmotnost čepel. Střelba zápěstím, která už u předešlých čepel byla velmi dobrá, je podle mě u této čepel ještě o něco lepší.“

Komentář hráčky D: „Musím říct, že byl poznat velký rozdíl ve stickhandlingu, protože tato čepel je znatelně lehčí než ty předchozí. Zároveň svoji roli hrálo také větší prohnutí/zakřivení, které celkově manipulaci s míčkem usnadňuje. Co se týče střelby, hodnotím všechny její druhy pozitivně.“

Komentář hráčky E: „Nejvýše hodnotím kategorii zpracování a stickhandling, při kterém se hodně projevila menší hmotnost a větší radius čepel. Celkově je třeba zmínit, že práce s touto čepelí je velmi příjemná. 'Vyrovnanost', kterou u čepel vždy posuzuji, je zde naprosto skvělá.“



Obrázek 37 - střelba zápěstím (prototyp č. 3)



Obrázek 38 - stickhandling (prototyp č. 3)

5.4 Prototyp č. 4

Stejně jako u třetího prototypu, i zde hráčky ocenily nižší hmotnost čepele (byť snížení hmotnosti nebylo tak výrazné jako v případě prototypu č. 3), která se pozitivně projevila při stickhandlingu. Spokojené byly hráčky celkově i se střelbou - nejvíce se střelbou příklepem. Naopak zpracování přihrávek bylo, podobně jako u prototypu č.2, vzhledem k vyšší tvrdosti materiálu čepele hodnoceno nižšími známkami.

Tabulka 14 - bodové hodnocení prototypu č. 4

Číslo prototypu:		4						
Hráč:		A	B	C	D	E	Průměr	
Kritérium:	Střelba tahem	9	9	8	9	9	8,8	
	Střelba příklepem	10	9	10	10	9	9,6	
	Střelba zápěstím	8	9	9	8	9	8,6	
	Zpracování přihrávky	8	7	7	8	8	7,6	
	Stickhandling	8	8	8	8	8	8	
Celkový průměr								8,52

Komentář hráčky A: „Nejvíce mě potěšila zejména razance střelby příklepem, která se odvíjí samozřejmě od materiálu, z něhož je čepel vyrobena, ale dle mého názoru tomu napomohl i design jejího výpletu, který způsobil, že dolní hrana je více tuhá než ta horní. Zpracování a individuální technika šly dobře.“

Komentář hráčky B: „S touto čepelí se mi celkově velice dobře střílelo. Se zpracováním přihrávek to bylo trochu horší, ale to je také dáno tím, že já obecně preferuji spíše měkčí čepele. Individuální technika hole šla dobře – pomohlo snížení hmotnosti čepele.“

Komentář hráčky C: „Tahle čepel je podle mě nejlepší volbou pro střelbu příklepem (nejen z hlediska razance, ale i přesnosti). Pro střelbu zápěstím mi také velmi vyhovovala. Stejně jako u třetí čepele, i u této jsem ráda, že se podařilo snížit hmotnost, která má značný vliv na stickhandling. Zpracování přihrávky bylo podobné jako v případě druhé čepele.“

Komentář hráčky D: „Skutečnost, že dolní část čepele je tužší než ta horní mě příjemně překvapila. Nejen že to mělo pozitivní vliv na střelbu příklepem, ale přišlo mi, že to pomohlo i lepšímu zpracování, právě proto, že horní půlka čepele byla méně tuhá než dolní (u klasických čepelí jsem se s tím doposud nesešla).“

Komentář hráčky E: „Velmi dobře se mi střílelo všemi způsoby. Stickhandling a zpracování také hodnotím pozitivně, přestože se jedná o tvrdší čepel. Určitě výrazně pomohla i její menší hmotnost.“



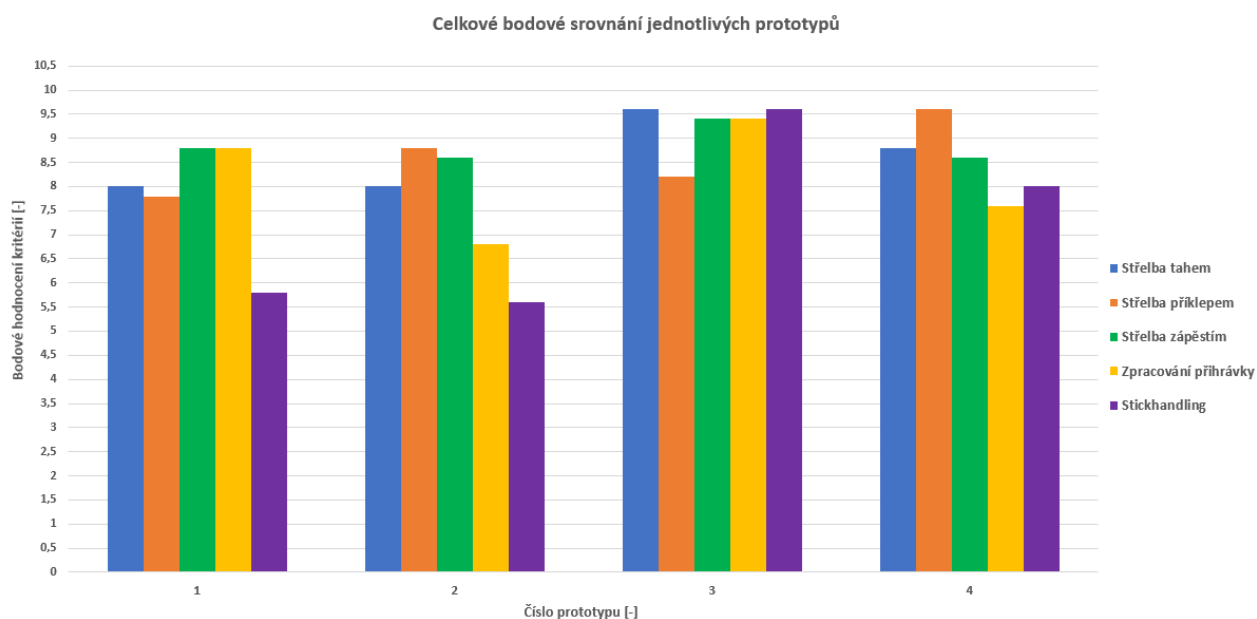
Obrázek 39 - střelba tahem (prototyp č. 4)



Obrázek 40 - zpracování přihrávky (prototyp č. 4)

5.5 Grafické srovnání

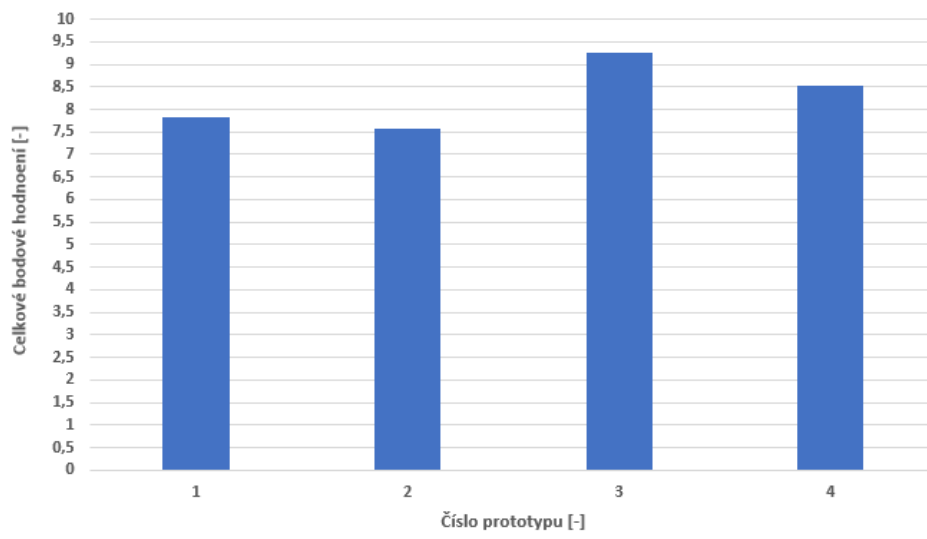
Grafické srovnání vychází z tabulek bodového hodnocení. Graf 2 ukazuje, jak si jednotlivé prototypy vedly v každém kritériu. Můžeme vidět, že u střelby tahem dosáhl nejvyššího hodnocení prototyp č. 3, naopak nejnižší hodnocení v této kategorii měly prototypy č. 1 a 2. Střelbu příklepem ovládl prototyp č. 4, nejméně hodnocený byl v této oblasti prototyp č. 1. Střelba zápěstím šla hráčkám nejlépe s prototypem č. 3 a naopak nejméně s prototypy č. 1 a 4. Zpracování přihrávky bylo nejvýše hodnoceno u prototypu č. 3, nejméně u prototypu č. 2. Manipulace s balonkem při stickhandlingu byla dle hráček jasně nejlepší u prototypu č. 3, naopak nejméně byl v tomto kritériu ohodnocen prototyp č. 2.



Graf 2 - celkové bodové srovnání jednotlivých prototypů

Graf 3 porovnává jednotlivé prototypy z hlediska celkového průměrného skóre, tedy znázorňuje, jakého počtu bodů dosáhl v průměru každý prototyp (za všechny kritéria dohromady). Můžeme vidět, že nejlépe se umístil prototyp č. 3 (průměrný počet bodů 9,24). Druhou nejlépe hodnocenou čepelí se stal prototyp č. 4 (průměrný počet bodů 8,52). Třetí skončil prototyp č. 1 (průměrný počet bodů 7,84), v těsném závěsu za ním pak prototyp č. 2 (průměrný počet bodů 7,56).

Celkové průměrné skóre jednotlivých prototypů



Graf 3 - celkové průměrné skóre jednotlivých prototypů

6 Ekonomické zhodnocení

Konvenční florbalové čepel se vyrábí vstřikováním. Čepel značky OxDog lze v obchodě zakoupit průměrně za 700 Kč. Celková cena prototypových čepelí (prototypy č. 1 a 3) z PETG, tisknutých na tiskárně Prusa MK3S, vychází téměř třikrát vyšší než průměrná cena konvenční čepel. Celková cena prototypů č. 2 a 4, tisknutých z PC-ABS na tiskárně Stratasys F370, je dokonce cca jedenáctinásobkem průměrné ceny konvenční čepel. Jak je možno vidět v tabulce níže (Tabulka 15), do celkové ceny prototypových čepelí byly zahrnuty náklady na tisk (hodinová sazba), cena spotřebovaného materiálu a přibližné náklady na postprocessing.

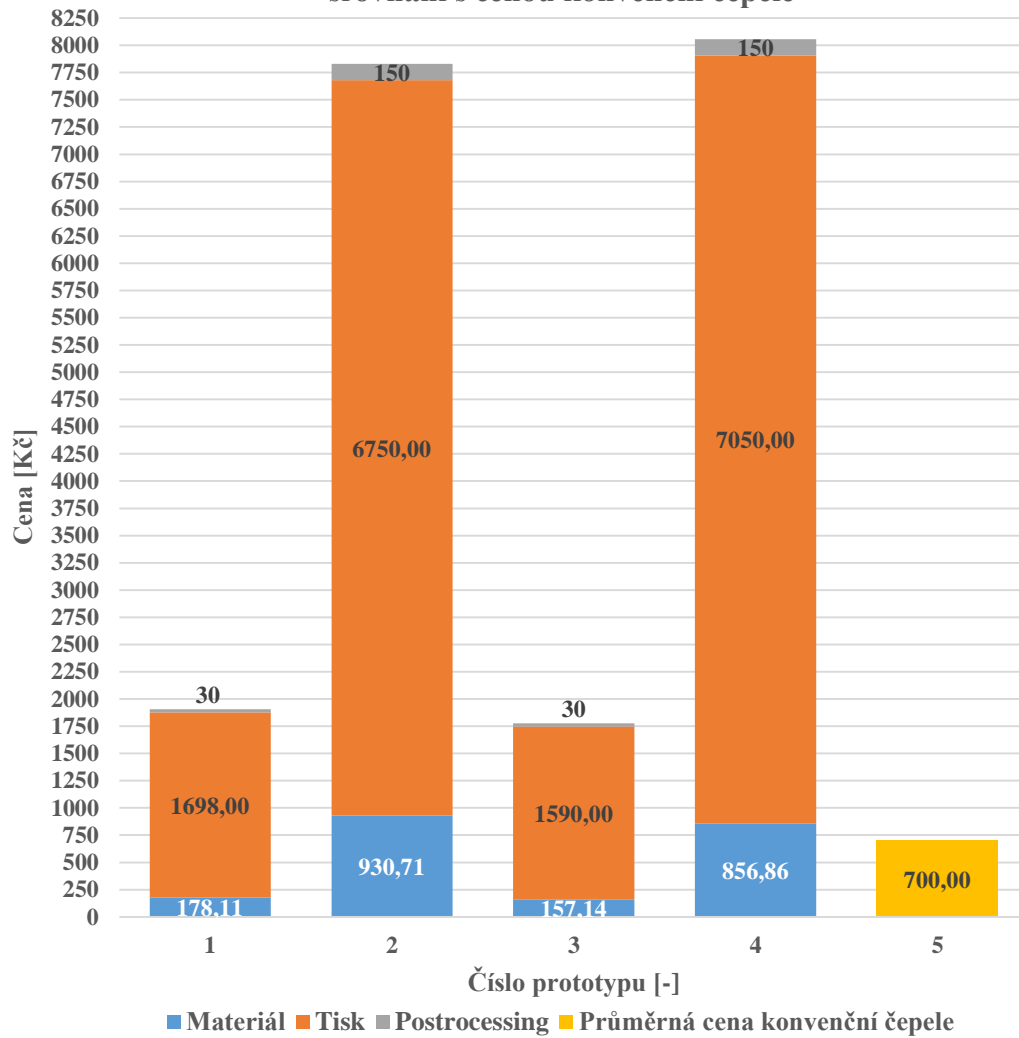
Tabulka 15 - cenové srovnání 3D tištěných prototypů a konvenční čepel

ČEPEL	HODINOVÁ SAZBA ZA TISK [Kč]	DOBA TISKU [h]	SPOTŘEBOVANÝ MATERIÁL (stavební + podpěrný) [g]	CENA SPOTŘEBOVANÉHO MATERIÁLU [Kč]	CENA ZA POSTPROCESSING [Kč]	CELKOVÁ CENA [Kč]
Prototyp č. 1	60	28,30	254,80	178,11	30	1906,11
Prototyp č. 2	300	22,50	239,20	930,71	150	7830,71
Prototyp č. 3	60	26,50	224,80	157,14	30	1777,14
Prototyp č. 4	300	23,50	220,60	856,86	150	8056,86
Konvenční	x	x	x	x	x	700

Pro větší přehlednost jsou náklady jednotlivých složek FDM tisku prototypů a jejich srovnání s cenou konvenčně vyrobené čepel zobrazeny v grafu (Graf 4).

Cena tištěných prototypů je sice mnohem vyšší, než je tomu u konvenčně vyráběných čepelí, ovšem je to cena za možnost výroby čepel na míru v krátkém čase. Zároveň nesmíme zapomenout na skutečnost, že šlo o kusovou výrobu, kdežto výslednou cenu konvenční, vstřikované čepel snižuje velkosériová výroba. Pokud bychom vstřikováním nechali vyrobit pouze jednu florbalovou čepel, její cena by se vzhledem k vysokým nákladům na zhotovení formy pohybovala ve stovkách tisíc Kč. Výroba florbalové čepel na míru vstřikováním tedy není reálná, jelikož by byla velice nákladná a časově náročná. A právě zde je obrovská výhoda 3D tisku, který nám umožňuje rychlé prototypování dle individuálních požadavků.

Náklady jednotlivých složek FDM tisku prototypů a jejich srovnání s cenou konvenční čepele



Graf 4 - cenové srovnání vytisknutých prototypů a konvenční čepele

7 Závěr

V teoretické části bakalářské práce byla provedena rešerše na téma aditivní technologie, která přiblížila historii 3D tisku, základní rozdělení jednotlivých metod a dále se podrobněji věnovala polymernímu 3D tisku se zaměřením na nejrozšířenější metodu FDM, včetně nejpoužívanějších materiálů. Teoretická část se dále zabývala technologicko-ekonomickým srovnáním polymerního 3D tisku a technologií vstřikování plastů. Bylo zjištěno, že vstřikování se vyplatí u velkých sérií, kdy se s rostoucím počtem vyrobených kusů „zaplatí“ pořizovací náklady na zhotovení formy. Naopak 3D tisk má oproti vstřikování mnohonásobně nižší pořizovací náklady, kdežto náklady na výrobu jednoho kusu jsou cca 5x vyšší. 3D tisk je výhodný pro menší série, kolem tisíceho vyrobeného kusu se finanční náklady výtisků a dílů vyrobených vstřikováním vyrovnávají. 3D tisk na rozdíl od vstřikování umožňuje měnit design součásti prakticky kdykoliv v průběhu výrobního procesu, zatímco u vstřikování změna designu znamená drahou výrobu další formy. Zároveň jsme 3D tiskem schopni vyrobit součásti se složitější geometrií, jelikož nás neomezuje forma - u vstřikování musíme kalkulovat se skutečností, že součást bude potřeba po ztuhnutí z formy vyjmout. Na druhou stranu součásti vyrobené vstřikováním dosahují lepší únavové pevnosti, jelikož u tištěných dílů dohází vzhledem k principu 3D tisku ke tvorbě vrubů, které snižují mez únavy.

Praktická část bakalářské práce se zabývala návrhem designu florbalové čepele pro výrobu technologií FDM. Prototypy byly navrženy tak, aby vyhovovaly především pro střelbu zápěstím a zároveň, aby byla zachována jistá rovnováha mezi všemi důležitými kritérii, která jsou ze strany hráčů kladeny na florbalovou čepel. Všechny prototypy proto měly vyztuženou špičku, která je při střelbě zápěstím nejvíce namáhána, v důsledku čehož časem narůstá její deformace, materiál se stává plastickým (měkne), a tím je negativně ovlivněna přesnost střelby. Dalším důvodem pro vyztužení špičky čepele bylo dosažení lepšího přenosu energie do míčku při střelbě, především pak při střelbě zápěstím. Zároveň bylo důležité zvolit vhodný materiál pro výrobu prototypů, aby se svými mechanickými vlastnostmi co nejvíce podobaly materiálům konvenčně vyráběných čepelí. Na základě rešerše o materiálech používaných pro technologii FDM byly zvoleny materiály PETG a „blend“ PC-ABS. Vzhledem k tomu, že první dva prototypy měly vyšší hmotnost, která se ukázala jako problémová při individuálních dovednostech (stickhandling), bylo hlavním cílem prototypů č. 3 a 4 snížení hmotnosti při současném zachování mechanických vlastností (zejména pevnosti). U prototypu č. 3 toto bylo řešeno zeštíhlením a použitím modifikátorů výplně. Zároveň bylo u tohoto prototypu mírně zvětšeno zakřivení, aby bylo možné zjistit případný vliv na střelbu. U prototypu č. 4 bylo snížení hmotnosti se současným zachováním pevnosti řešeno změnou designu výpletu, kdy hustší výplet byl v oblasti patky a uchycení na hůl, která jsou obecně na čepeli nejvíce namáhána, a po celé spodní hraně čepele až ke špičce. Naopak v horní polovině čepele bylo méně materiálu. Prototypy byly tisknuty na tiskárně Prusa MK3S (prototypy č. 1 a 3, materiál PETG) a na tiskárně Stratasys F370 (prototypy č. 2 a 4, materiál PC-ABS), patřících Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie Fakulty strojní. Postprocessing spočíval v odstranění podpor a broušení smirkovým papírem pro dosažení hladšího povrchu.

Prototypy byly testovány hráčkami Extraligy žen, české nejvyšší florbalové soutěže, přičemž bylo sledováno pět kritérií: střelba tahem, střelba zápěstím, střelba příklepem,

zpracování přihrávek a stickhandling, která byla hodnocena na škále 1 až 10 (1 - nejnižší známka, 10 - nejvyšší známka) Z hodnocení hráček vyplývá, že u všech prototypů mělo vyztužení špičky čepele pozitivní efekt na střelbu zápěstím. Nejlepší rovnováhy mezi jednotlivými kritérii bylo dosaženo u prototypu č. 3, který také opanoval celkové hodnocení (průměrný počet bodů 9,24). Druhé místo (průměrný počet bodů 8,52) na základě hodnocení hráček získal prototyp č. 4, u něhož byla velmi pozitivně hodnocena především střelba příklepem, což některé hráčky přisuzovaly tužší spodní části čepele. Celkové hodnocení prototypů č. 1 a 2 nepřekročilo průměr osmi bodů zejména kvůli vyšší hmotnosti, v důsledku čehož mělo kritérium „stickhandling“ nižší známky.

Součástí praktické části bylo též provedení ekonomického zhodnocení, kdy byly všechny zhotovené prototypy srovnány s konvenčními čepeli vyráběnými vstřikováním. Bylo spočteno, že celková cena prototypových čepelí (prototypy č. 1 a 3) z PETG, tisknutých na tiskárně Prusa MK3S, vychází téměř třikrát vyšší než cena konvenční čepele, kterou lze v obchodě zakoupit v průměru za 700 Kč. Celková cena prototypů č. 2 a 4, tisknutých z PC-ABS na tiskárně Stratasys F370, činila cca jedenáctinásobek průměrné ceny konvenční čepele. Do celkové ceny prototypových čepelí byly zahrnuty náklady na tisk (hodinová sazba), cena spotřebovaného materiálu a přibližné náklady na postprocessing. Vytisknuté prototypy jsou tedy výrazně dražší než konvenční, vstříkované čepele, nicméně je to cena za zhotovení čepele na míru v krátkém čase.

8 Bibliografie

- [1] The additive manufacturing process. In: *Hubs* [online]. Amsterdam, Nizozemsko: Hubs A Protolab Company, - [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process/>
- [2] The advantages of 3D printing. In: *Hubs* [online]. Amsterdam, Nizozemsko: Hubs A Protolab Company, - [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing/>
- [3] *WHAT ARE THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF 3D PRINTING* [online]. Velká Británie: TWI, - [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons>
- [4] *History of 3D Printing Explained* [online]. Taiwan: Phrozen, 2021 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://phrozen3d.com/blogs/resin-3d-printing-latest-news/history-of-3d-printing-explained>
- [5] *The brief but building history of 3D printing* [online]. New York, USA: digitaltrends, 2019 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/history-of-3d-printing-milestones/>
- [6] STŘÍTESKÝ, Ondřej a Josef PRŮŠA. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. První vydání. Praha: Prusa Research a.s., 2019 [cit. 2021-11-27]. ISBN -. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou_490/
- [7] 3D revolucija se nezaustavljivo širi. In: *Institut za ambalažu i tiskarstvo Tectus* [online]. Záhřeb, Chorvatsko: Tectus, 2014 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <http://www.ambalaza.hr/hr/croprint/2014/9/3d-revolucija-se-nezaustavljivo-siri,416,13838.html>
- [8] *Metal 3D Printing: Where Are We Today?* [online]. Velká Británie: AMFG, 2019 [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2019/02/19/metal-3d-printing-where-are-we-today/>
- [9] *Stereolitografie* [online]. Brno: Nová média, 2019 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/wiki/stereolitografie/>
- [10] *Svět 3D: Druhy technologií 3D tisku* [online]. Brno: -, - [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <http://svet-3d.cz/druhy-technologie.html>
- [11] DLP. In: *3D - tisk.cz* [online]. Brno, ČR: Nová média, 2019 [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/wiki/dlp/>
- [12] SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers. In: *Formlabs- High Performance 3D Printers, Finally Within Reach* [online]. USA: Formlabs, - [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>

- [13] Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. In: *Formlabs - High Performance 3D Printers, Finally Within Reach* [online]. USA: Formlabs, - [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [14] *What is SLS 3D printing?* [online]. Amsterdam, Nizozemí: Hubs, - [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/#how-does-sls-3d-printing-work>
- [15] *FDM - Fused Deposition Modeling* [online]. Praha: SPŠ NA PROSEKU, - [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <http://www.sps-prosek.cz/soubory/S/CAX/FDM.pdf>
- [16] *What is FDM 3D printing?* [online]. Amsterdam: Hubs, 2017 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>
- [17] *Přehled technologií 3D tisku* [online]. Libhošť: dk metal, 2018 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologii-3D-tisku>
- [18] *SIMPLIFY 3D - Ultimate Materials Guide* [online]. -: SIMPLIFY 3D, 2021 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/>
- [19] *Prusa Knowledge Base* [online]. Praha: PRUSAPRINTERS, 2021 [cit. 2021-12-07]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/>
- [20] *Přehled materiálů pro 3D tisk* [online]. ČR: sharplayers, - [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://sharplayers.cz/support/prehled-materialu-pro-3d-tisk/>
- [21] *3D printing guides: The worthwhile struggle with Polycarbonate* [online]. Německo: -, 2014 [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://toms3d.org/2014/10/26/3d-printing-guides-the-worthwhile-struggle-with-polycarbonate/>
- [22] Supports in 3D Printing: A technology overview. In: *Hubs* [online]. Amsterdam, Nizozemsko: Hubs A Protolab Company, - [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview/#fdm>
- [23] *Vše co potřebujete znát o tiskových výplních* [online]. ČR: PRUSAPRINTERS, 2021 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/vse-co-potrebuje-ze-znat-o-tiskovych-vyplnich_43579/
- [24] *K čemu slouží nastavení perimeters?* [online]. ČR: PRUSAPRINTERS, 2015 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/k-cemu-slouzi-nastaveni-perimeters_3963/
- [25] *3D tisk – Teplota trysky, rychlost tisku a materiál* [online]. ČR: inventorblog, 2017 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/3d-tisk-teplota-trysky-rychlost-tisku-material/>
- [26] *“Modeluj” s PrusaSlicerem – jak na práci s modifikátory* [online]. ČR: PRUSAPRINTERS, 2019 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/modeluj-s-prusaslicerem-prace-s-modifikatory/>

- [27] *Post processing for FDM printed parts: A comprehensive guide describing the range of post-processing options for FDM printed parts* [online]. Amsterdam, Nizozemí: Hubs, - [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/#sanding>
- [28] *Co je pískování? čím se pískuje?* [online]. ČR: Pískovačka.cz, 2016 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje/>
- [29] *Abraziva* [online]. ČR: Reno - Tech.cz, s.r.o., - [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <http://www.abraziva.cz/>
- [30] *TRYSKACÍ SYSTÉMY* [online]. ČR: GDS, - [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <http://tryskani-piskovani.gds.cz/tryskaci-systemy>
- [31] *Tryskání - Pískování* [online]. ČR: Vladimír Minczér, - [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <http://www.tryskani-piskovani.com/index.html>
- [32] *Omilání* [online]. ČR: ELUC, - [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1388>
- [33] *Omilání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů* [online]. ČR: MM Průmyslové spektrum, 2002, [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jako-univerzalni-metoda-pro-upravu-povrchu>
- [34] *Lepení tištěných dílů* [online]. ČR: sharplayers, 2021 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://eshop.sharplayers.cz/a/lepeni-tistenych-dilu>
- [35] *Smoothing & Post-Processing Tips* [online]. Polsko: Zortrax, - [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://support.zortrax.com/apoller-tips-tricks/>
- [36] *Jak opracovat materiál z 3D tisku* [online]. ČR: Marcus-Models, 2019 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.marcus-models.cz/l/jak-opracovat-material-z-3d-tisku-fdm/>
- [37] ŠMÍD, Josef. *Postprocessing 3D tisku v praktických činnostech na ZŠ*. ČR, 2020. BP. Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity.
- [38] *Jak upravit model po 3D tisku* [online]. ČR: FUTLAB, 2018 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://futlab.cc/uprava-modelu-po-3d-tisku/>
- [39] *Jak vyhladit 3D tisky pomocí chemického vyhlazování* [online]. ČR: PRUSAPRINTERS, 2020 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/jak-vyhladit-3d-tisky-pomoci-chemickeho-vyhla-zovani_36268/
- [40] SUNAY, Nedim, Mert KAYA a Yusuf KAYNAK. *CHEMICAL POST-PROCESSING METHODS FOR ENHANCING SURFACE PROPERTIES OF PARTS FABRICATED BY ADDITIVE MANUFACTURING: A REVIEW: A REVIEW*. 2020, **38**, 2027-2042.
- [41] LALEHPOUR, Amirali, Conner JANETEAS a Ahmad BARARI. Surface roughness of FDM parts after post-processing with acetone vapor bath smoothing process. *The*

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, **95**, 1-16. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-1165-5
- [42] *The Best Methods for PLA Smoothing* [online]. -: 3D Printer World, 2021 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://3dprinterworldexpo.com/the-best-methods-for-smoothing-3d-prints/>
- [43] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. První vydání. ČR: Code Creator, s.r.o., 2016 [cit. 2022-03-18]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/17.html>
- [44] *Pokovení plastů POP – moderní procesy pokovení plastů (POP)* [online]. ČR: DONAUCHEM, - [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.donauchem.cz/Products-Solutions/Range-of-goods/Galvanization/plastic-plating>
- [45] *DOPLŇKOVÉ TECHNOLOGIE PRO ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ* [online]. ČR: TUL Liberec, - [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm#122
- [46] *Vakuové pokovení plastů* [online]. ČR: PRECIOSA, a.s., - [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.pokoveni-lakovani.cz/cs/vakuove-pokoveni-plastu/>
- [47] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů 2: Simulace, analýzy, odstraňování vad, 3D tisk*. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-1294-4.
- [48] KREBS, Stefan, Ladislav KOLAŘÍK a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie zpracování plastů a kompozitů*. První vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [49] *Injection molding: The definitive engineering guide* [online]. Amsterdam, Nizozemí: Hubs, - [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/guides/injection-molding/#the-basics>
- [50] *What Materials Are Used In Injection Molding?* [online]. Kanada: Rex Plastics, 2019 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://rexplastics.com/plastic-injection-molding/materials-used-injection-molding>
- [51] *Plastic Injection Molding vs 3D Printing – Which is Better?* [online]. Wisconsin? USA: Kaysun, 2020 [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: <https://www.kaysun.com/blog/plastic-injection-molding-vs-3d-printing>
- [52] *3D tisk versus vstřikování plastů - jaký způsob výroby má smysl?* [online]. Praha: sharplayers, 2021 [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: https://sharplayers.cz/3d-tisk-versus-vstrikovani-jaky-zpusob-vyroby-ma-cenu/?fbclid=IwAR3yqvVhoZFtHoKICKj0jDdjqiAiB8F1ZPcn5C2TLwR0FsQD__0iWoZbJ6w

- [53] *MATERIAL REGULATIONS - EDITION 2020* [online]. -. Švédsko: IFF, 2020 [cit. 2022-03-28]. ISBN -. Dostupné z: <https://floorball.sport/rules-and-regulations/material-regulations/>
- [54] *The Floorball Book Equipment and Maintenance* [online]. První vydání. USA: Creative Commons, 2008 [cit. 2022-03-28]. ISBN -. Dostupné z: https://asiakas.kotisivukone.com/files/sportclubhyvinkaa.kotisivukone.com/Harjoitusmaterilaalit/The_floorball_book_Equipment_and_Maintenance.pdf
- [55] *History of Floorball* [online]. USA: Floorball Planet, - [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: https://www.floorballplanet.com/category/FB_HISTORY.html
- [56] *AreX - české hole* [online]. ČR: SPORT 2020, - [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://www.jarvec.cz/>
- [57] *How to Choose A Floorball Stick in 2020 (Beginner Guide)* [online]. Švédsko: FloorballToday, 2019 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://floorballtoday.com/how-to-choose-a-floorball-stick/>
- [58] *Florbalové čepele Oxdog* [online]. ČR: EXE SPORT, - [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://www.exesport.net/florbalove-cepele-oxdog/>
- [59] *Konzultace s firmou FatPipe*. (emailová korespondence), 2022.
- [60] *Všeobecné vlastnosti materiálu polyamid (PA)* [online]. ČR: Heyman, - [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.heyman.cz/vlastnosti-polyamidu>
- [61] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. První. ČR: Code Creator, s.r.o., 2015 [cit. 2022-04-04]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [62] *Rozdělení plastů* [online]. ČR: VACULA, - [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.vacula.cz/prehled-polymeru/rozdeleni-plastu/>
- [63] *ROZDÍLY MEZI PP A PE ČEPELÍ* [online]. ČR: eflorbal.cz, 2019 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.eflorbal.cz/blog/31811/rozdily-mezi-pp-a-pe-cepeli>
- [64] *Anatomy of a Blade* [online]. USA: FloorballPlanet, 2020 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: https://www.floorballplanet.com/ART_ANATOMY-BLADE.html?fbclid=IwAR3MLg_LFoDKPO3W4vNtkwRnFcXTZ_TrGpXa1bYfuumG59PNknek9DtR1pY
- [65] *UNIHOOC EPIC TITAN* [online]. Finsko: Lujakunto, - [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.lujakunto.com/product/10476/unihoc-epic-titan-superskin-pro-26-whitesilver-20-floorball-stick>
- [66] *Stratasys F370* [online]. Velká Británie: sys, - [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.sys-uk.com/3dprinters/stratasys-f370/>

[67] *Prusa MK3S* [online]. ČR: MAJKL3D.cz, - [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.majkl3d.cz/p/prusa-mk3-bear-2040>

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - rozdělení 3D tisku (upraveno) [9] [10]	13
Obrázek 2- schéma SLA tiskárny [10]	13
Obrázek 3 - schéma DLP tiskárny (upraveno) [12]	14
Obrázek 4 - schéma SLS tiskárny (upraveno) [13]	15
Obrázek 5 - schéma principu FDM tiskárny (upraveno) [15]	16
Obrázek 6 - ukázka přemostování (bridging) [6]	21
Obrázek 7 - znázornění vlivu orientace na použití podpor (písmeno H)	21
Obrázek 8 – perimetry (žlutě) [24]	22
Obrázek 9 - injektorové tryskání [30]	24
Obrázek 10 - tlakovzdušné tryskání [30]	24
Obrázek 11 - mechanické tryskání (metací kolo) [30]	25
Obrázek 12 - schéma vstřikovacího stroje [48]	28
Obrázek 13 - maximální povolené zakřivení čepele dle IFF [53]	31
Obrázek 14 - plné čepele Cosom [55]	32
Obrázek 15 - rovné čepele bez vybrání (upraveno) [56]	32
Obrázek 16 - příklad moderní čepele (OxDog Optilight) [58]	32
Obrázek 17 - povolené rozměry florbalové čepele dle IFF [53]	34
Obrázek 18 - tiskárny Stratasys F370 (vlevo) a Prusa MK3S (vpravo) [66] [67]	36
Obrázek 19 - ukázka orientace modelu čepele	36
Obrázek 20 - model prototypu č. 1	37
Obrázek 21 - prototyp č. 1 bezprostředně po vytisknutí	38
Obrázek 22 - ukázka modelu v prostředí GrabCAD (prototyp č. 2)	38
Obrázek 23 - prototyp č. 2 bezprostředně po vytisknutí	39
Obrázek 24 - model prototypu č. 3	39
Obrázek 25 - použití modifikátorů (PrusaSlicer)	40
Obrázek 26 - prototyp č. 3 bezprostředně po vytisknutí	40
Obrázek 27 - model prototypu č. 4	41
Obrázek 28 - prototyp č. 4 bezprostředně po vytisknutí	41
Obrázek 29 - rozpuštění podpor v lázni hydroxidu sodného	42
Obrázek 30 - ruční broušení (za mokra)	42
Obrázek 31 - prototypové čepele po postprocessingu	43
Obrázek 32 - ukázka stickhandlingu	44
Obrázek 33 - stickhandling (prototyp č. 1)	46
Obrázek 34 - detail prasklého místa (prototyp č. 1)	46
Obrázek 35 - střelba příklepem (prototyp č. 2)	48
Obrázek 36 - stickhandling (prototyp č. 2)	48
Obrázek 37 - střelba zápěstím (prototyp č. 3)	50
Obrázek 38 - stickhandling (prototyp č. 3)	50
Obrázek 39 - střelba tahem (prototyp č. 4)	52
Obrázek 40 - zpracování přihrávký (prototyp č. 4)	52

10 Seznam tabulek

Tabulka 1 - výhody a nevýhody materiálu PLA [19]	17
Tabulka 2 - výhody a nevýhody materiálu PETG [19].....	18
Tabulka 3 - výhody a nevýhody materiálu ABS [19].....	18
Tabulka 4 - výhody a nevýhody materiálu ASA [19].....	19
Tabulka 5 - výhody a nevýhody materiálu PC [19].....	20
Tabulka 6 - výhody a nevýhody materiálu PP [19]	20
Tabulka 7 - tiskové parametry prototypu č. 1	37
Tabulka 8 - tiskové parametry prototypu č. 2	38
Tabulka 9 - tiskové parametry prototypu č. 3	40
Tabulka 10 - tiskové parametry prototypu č. 4	41
Tabulka 11 - bodové hodnocení prototypu č. 1	45
Tabulka 12 - bodové hodnocení prototypu č. 2	47
Tabulka 13 - bodové hodnocení prototypu č. 3	49
Tabulka 14 - bodové hodnocení prototypu č. 4	51
Tabulka 15 - cenové srovnání 3D tištěných prototypů a konvenční čepele	55

11 Seznam grafů

Graf 1 - srovnání nákladů 3D tisku a vstřikolisu (upraveno) [52].....	29
Graf 2 - celkové bodové srovnání jednotlivých prototypů	53
Graf 3 - celkové průměrné skóre jednotlivých prototypů.....	54
Graf 4 - cenové srovnání vytisknutých prototypů a konvenční čepele.....	56