



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## OZUBENÉ SOUKOLÍ VYROBENÉ 3D TISKEM

GEARS MADE BY 3D PRINTING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Bělota

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2022



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Martin Bělota**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Milan Kalivoda**  
Akademický rok: 2021/22

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

### Ozubené soukolí vyrobené 3D tiskem

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D tisk z plastu či kovového prášku umožňuje vyrobit ozubené soukolí. Jeho parametry a využití je víceméně odlišné od výrobků ze standardní obráběcí technologie.

#### Cíle bakalářské práce:

- Přehled 3D tisku.
- Parametry ozubených kol.
- Konstrukce vytipovaného soukolí.
- Příprava výrobního procesu.
- 3D tisk prototypu.
- Zhodnocení.

#### Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

FREIBAUER, Martin, Hana VLÁČILOVÁ a Milena VILÍMKOVÁ. Základy práce v CAD systému SolidWorks. 2. vyd. Brno: Computer Press, a. s., 2010. 326 s. ISBN 978-80-251-2504-5.

GIBSON, Ian, David W. ROSEN and Brent STUCKER. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. p. 459. ISBN 14-419-1120-0.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 651. ISBN 0-19-514206-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

V průběhu této práce je řešena problematika 3D tisku zaměřená na výrobu ozubených kol. Cílem je vytvořit ozubená soukolí na základě zkonstruovaných modelů ozubených kol pomocí technologie 3D tisku FDM. V teoretické části práce je popsána technologie 3D tisku včetně materiálů používaných pro tisk a vytipovaných technologií 3D tisku. Dále jsou v práci popsány parametry čelních ozubených kol a kuželových, protože jimi se praktická část zabývá. Praktická část práce se zaměřuje na výrobu ozubených soukolí od návrhu, konstrukce, přípravy výrobního procesu až po tisk prototypu a dokončovací úpravy prototypu.

### **Klíčová slova**

3D tisk, ozubené soukolí, FDM, PLA, prototyp

## **ABSTRACT**

In the course of this work, the issue of 3D printing focused on the production of gears is addressed. The goal is to create gears based on designed gear models using 3D FDM printing technology. The theoretical part of the work describes the technology of 3D printing, including materials used for printing and selected technologies of 3D printing. Furthermore, the parameters of spur and bevel gears are described in the work because the practical part deals with them. The practical part of the work focuses on the production of gears from design, construction, preparation of the production process to the printing of the prototype and finishing of the prototype.

### **Key words**

3D printing, gears, FDM, PLA, prototype

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BĚLOTA, Martin. *Ozubené soukolí vyrobené 3D tiskem* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/136894>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Kalivoda.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výroba ozubeného soukolí 3D tiskem vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

---

místo, datum

---

Martin Bělota

---

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu mé práce Ing. Milanu Kalivodovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Sebastianu Matušovi za zapůjčení 3D tiskárny a rady týkající se 3D tisku. Tímto bych chtěl také poděkovat své rodině za neustálou podporu během celého studia.

---



**OBSAH**

ÚVOD .....	10
1 PROBLEMATIKA 3D tisku .....	11
1.1 Využití technologie 3D tisku.....	11
1.2 Historie 3D tisku .....	13
2 MATERIÁLY PRO 3D TISK .....	16
2.1 Polymery .....	16
2.2 Resiny .....	18
2.3 Kovy .....	19
3 TECHNOLOGIE 3D TISKU .....	20
3.1 MJF (Multi Jet Fusion).....	20
3.2 LOM (Laminated Object Manufacturing).....	21
3.3 SLA (Stereolitografie).....	22
3.4 SLS (Selective Laser Sintering) .....	24
3.5 DMLS (Direct Metal Laser Sintering) .....	25
3.6 FDM (Fused Deposition Modeling) .....	26
4 PARAMETRY OZUBENÝCH KOL.....	29
4.1 Zubové profily .....	29
4.2 Korekce evolventního ozubení .....	30
4.3 Základní parametry .....	31
4.4 Čelní soukolí.....	33
4.5 Kuželové soukolí .....	37
5 KONSTRUKCE VYTIPOVANÝCH SOUKOLÍ.....	43
5.1 Výpočet převodových poměrů a počtu zubů ozubených kol.....	43
5.2 Výpočet kuželového soukolí .....	44
5.3 Výpočet čelního soukolí .....	45
6 PŘÍPRAVA VÝROBNÍHO PROCESU .....	47
6.1 Tvorba čelního soukolí .....	47
6.2 Tvorba kuželového soukolí .....	50
6.3 Konstrukce zbylých prvků sestavy .....	51
6.4 Volba materiálu a nastavení parametrů tisku .....	54
7 TISK PROTOTYPU .....	58
7.1 Výběr 3D tiskárny .....	58
7.2 Příprava tisku.....	60
7.3 Proces tisku.....	61
7.4 Postprocessing.....	62
8 ZHODNOCENÍ.....	66
8.1 Porovnání materiálů .....	66
8.2 Doba tisku sestavy .....	68
ZÁVĚR.....	70
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	76
SEZNAM PŘÍLOH .....	78

---

## ÚVOD

Technologie 3D tisku spadá do kategorie aditivního procesu výroby, při kterém nevzniká výrobek odebráním materiálu ale jeho přidáváním. Byla vyvinuta za účelem rychlé výroby prototypů sloužících k demonstraci a optimalizaci výrobního procesu daného objektu. Aditivní proces výroby také umožňuje výrobu tvarově složitých výrobků, které by nebylo možné vyrobit žádnou jinou technologií nebo by musel být vyroben z více částí. Díky rychlému vývoji aditivní výroby nabízí technologie 3D tisku široké spektrum tiskových technologií použitelných takřka ve všech oblastech průmyslu. V dnešní době lze tisknout rozsáhlého množství materiálu od polymerům, kovů až po dřevo nebo materiály vhodné ke konzumaci. Materiály určené k 3D tisku se vyrábějí ve formě granulátu, prášku, tiskové struny nebo fotocitlivé pryskyřice.

Teoretická část práce slouží k lepšímu poznání a pochopení problematiky aditivní výroby 3D tiskem společně s ozubenými převody, což bylo také hlavním důvodem výběru tohoto tématu. V této části se nachází vybrané technologie výroby 3D tiskem a nejčastěji používané materiály při tisku. Dále se zde vyskytují parametry ozubených převodů převážně čelních ozubených soukolí a kuželových, neboť jimi se praktická část zabývá.

Praktická část je věnována čelnímu ozubenému soukolí a kuželovému soukolí jako součást převodové skříně vyrobené technologií FDM. Celý proces je zde kompletně popsán od návrhu ozubených kol pro vybrané vstupní parametry až po kompletaci sestavy. Návrh modelů je zprostředkován použitím dvěma různými výpočtovými softwary, na kterých je demonstrován rozdíl ve výstupním náčrtu pro daný model. Požadavek na výrobu sestavy je sestavit všechny její komponenty, kromě spojovacích prvků, 3D tiskem. Na základě tohoto požadavku jsou navrženy všechny komponenty tak, aby nebyly omezeny výrobními schopnostmi použité 3D tiskárny.

Poslední části práce se zaměřují na přípravu tisku, tisk, dokončovací operace a zhodnocení tisku. Příprava tisku a tisk jsou optimalizovány na základě výběru materiálu, tiskárny a také na výsledcích předešlých vytištěných prototypů. V zhodnocení výtisku se nachází porovnání s vybranými materiály používaných pro tisk mechanických součástí. Posledním bodem práce je doporučení pro tisk navržených součástí případně pro tisk mechanických součástí.

## 1 PROBLEMATIKA 3D TISKU

Technologie 3D tisku se využívá pro tvorbu trojrozměrného reálného objektu podle digitálního modelu prostřednictvím automatizovaných strojů, které používají některé z mnoha technologií 3D tisku. Jedná se o aditivní výrobu, kde výsledný výrobek vzniká postupným přidáváním materiálu, což je opak subtraktivní výroby, při které je materiál odebírán obráběcími stroji [1; 2].

Materiál je při 3D tisku postupně nanášen ve velmi tenkých souvislých vrstvách, které se navzájem spojují spékáním nebo tavením. Proces tisku je v dnešní době natolik pokročilý, že jej lze považovat za automatizovanou výrobu, při které není potřeba lidské obsluhy a je možné výrobky ihned po výrobě používat s výjimkou výrobků, u kterých je nutné využít podpěr bránících zbourání modelu nebo k podepírání převislých částí, které musí být po tisku odstraněny [2; 3].

Chronologický postup výroby prototypu pomocí 3D tisku se skládá ze tří procesů bez ohledu na použitou technologii tisku. První proces, který se jmenuje preprocessing se zabývá tvorbou digitálního modelu za použití libovolného programu pro modelování trojrozměrných objektů následně pak jeho exportování do formátu STL (.stl), Additive Manufacturing File (.amf) nebo 3D Manufacturing Format (.3mf). Po vymodelování modelu a jeho naformátování se za použití programu určeného pro přípravu 3D tisku, například Ultimaker Cura pro tisk technologií FFF/FDM nebo Formlabs PreForm pro tisk technologií SLA, ve kterém se nastaví parametry tisku jako jsou kvalita tisku, volba podpor, rychlost tisku nebo materiál. Dalším procesem je processing, ve kterém dochází k vytištění prototypu. Processing se liší s použitou technologií díky čemuž nabízí 3D tisk spoustu možností výroby prototypu. Po dokončení tisku následuje poslední proces, který se nazývá postprocessing zabývající se broušením, lakováním, kytováním, odstraňováním podpor nebo dalším obráběním, který u prototypu může ale nemusí být použit záleží podle toho, zda je prototyp určen jen jako prvek sloužící pro vizualizaci objektu nebo zda je určen pro další použití [4; 5; 6].

### 1.1 Využití technologie 3D tisku

Rozsáhlé množství technologií 3D tisku a materiálů používaných při tisku nabízí široké spektrum uplatnění napříč obory jako jsou například produktový design, zdravotnictví nebo pro domácí využití. Pomocí technologie 3D tisku lze vyrobit tvarově složité výrobky, které by nebylo možno vyrobit žádnou jinou výrobní technologií, tady ovšem lze využít 3D tisk pro výrobu levných a rychlých prototypů sloužících pro lepší vizualizaci objektů [2; 3].

Možnosti užití 3D tisku:

- **Strojírenství** – Dynamický rozvoj aditivní výroby v oblasti strojírenství a výrobního průmyslu zapříčinil větší zájem o technologii 3D tisku, díky které lze výrazně urychlit, zlevnit, a hlavně zjednodušit výrobu kusových výrobků, prototypů nebo funkčních dílů. Aditivní výroba poskytuje mnoho možností v rámci optimalizace topologie a designu, což nabízí nalezení nejlepšího optimálního řešení výrobku vzhledem k jeho pevnosti, hmotnosti a náklady na výrobu obzvláště v leteckém a automobilovém průmyslu, kde se snížení hmotnosti dlouhodobě projeví na úspoře provozních nákladů. Ve strojírenském průmyslu se z velké části uplatňuje 3D tisk z kovových materiálů, převážně u výroby forem pro vstřikování nebo odlévání. Pro rychlou výrobu forem na odlévání kovů byla taktéž vyvinuta technologie umožňující 3D tisk písku a furanové pryskyřice sloužící jako pojivo, u které odpadá čas potřebný pro formování písku nebo na základě prvního odlitku lze velmi rychle a snadno optimalizovat proces výroby například vtokové soustavy nebo odvětrávání formy. Jelikož je vytisknuta přímo forma eliminují se tak možné deformace formy způsobené rozklepáváním a vyjímáním modelu. Aditivní výroba najde své uplatnění

především v automobilovém, leteckém či kosmickém průmyslu, kterých se stává nedílnou součástí obzvláště výrobou náhradních dílů nebo odlehčených konstrukcí se stejnými i lepšími pevnostními vlastnostmi, díky kterým dochází k úspoře za provozní náklady [7; 8; 9].

- **Stavebnictví a architektura** – Pro lepší vizualizaci budov nebo celého komplexu budov se v dnešní době ve spoustě případech sahá po 3D tisku, neboť člověk, který nemá technické vzdělání, by mohl mít značné problémy s pochopením záměrů architekta nebo projektanta na základě předložené výkresové dokumentace. Modely používající se k vizualizaci mohou být vytisknuty jako celek budovy nebo jako dělený model, který má tu výhodu, že může být rozložen na jednotlivé patra budovy s rozložením všech místností i nábytku, který tyto místnosti obsahují. Stavebnictví využívá také stále více pro realizaci projektů a stavbě domů 3D tisk umožňující tisk převážně z rychleschnoucí směsi betonu (obr. 1). Vytištěné domy jsou oproti klasickému způsobu stavby zhotoveny poměrně rychle a za nižší náklady. Výhodou takto zhotovených staveb je nízká energetická náročnost umožněná speciálními betonovými směsí, které díky jejich vývoji nepotřebují zateplení budovy, a taky šetrnost životního prostředí, neboť stavby mají nízkou energetickou zátěž a lze je recyklovat [7; 10].



Obr. 1 Průběh tisku domu pomocí jednoramenné 3D tiskárny [10].

- **Zdravotnictví** – 3D tisku ve zdravotnictví má velice široké uplatnění počínaje tiskem respirátorů až po tisk implantátů. V případech, kdy se jedná o tisk individuálního implantátu či protézy se podle optického skenování nebo výpočetní tomografie sestaví model, který je následně prostřednictvím tiskárny zhotoven a je možné tak tisknout i tvarově náročné díly, které by nebylo možné zhotovit jinou technologií nebo by byla jejich výroba velice nákladná. Vytištěné implantáty musí být vysoce odolné, tlumit rázy a trvanlivé proto se k tisku převážně používá titanový prášek (obr. 2). Protézy jsou tištěny na míru pacienta a na základě jeho potřeb, které mohou zahrnovat například samotný design. Většina takto tištěných protéz jsou v podstatě levnější, než protézy vyrobeny standardním způsobem výroby a taky jsou odlehčeny [7; 11].



Obr. 2 Lící implantát zhotoven 3D tiskem z titanu [11].

- **Domácí využití** – Poměrně jednoduchá a snadno naučitelná manipulace s 3D tiskárnami patří mezi jedny z mnoha výhod, které mají zapříčinění podstatně velký zájem o tuto technologii pro domácí využití. S rostoucím zájmem o 3D tisk se zároveň rozrůstá i trh s 3D tiskárnami, díky čemuž klesla pořizovací cena většiny tiskáren a jsou tak dostupné pro každého, kdo by se chtěl této technologii věnovat. Pro domácí využití bylo vytvořeno spousta aplikací na vytváření 3D modelu, které nepotřebují rozsáhlé znalosti CAD softwaru nebo lze jednoduše modely stáhnout z jakékoliv webové stránky tomu určené. Následně pak stačí jen model implementovat do programu určeného pro přípravu 3D tisku a model vytisknout. Většina uživatelů 3D tiskáren volí technologii FFF (Fused Filament Fabrication) na základě své cenové dostupnosti a provozním nákladům na rozdíl například od technologie SLA (Stereolitografie). V domácím využití slouží 3D tiskárny především pro tisk dekorací, hraček, figurek nebo doplňků do domácnosti. Domácí uživatelé 3D tiskáren jsou omezeni pouze svou kreativitou a svými schopnostmi viz příloha P1 [1; 7].

## 1.2 Historie 3D tisku

Oproti klasickým výrobním technologiím je technologie 3D tisku poměrně mladou technologií, jejíž počátky sahají od roku 1981, kdy Dr. Hideo Kodama podal patentovou přihlášku na první zařízení určené pro rychlou výrobu prototypů. Zařízení fungovalo na principu vytvrzování fotocitlivé pryskyřice pomocí ultrafialového světla. Dr. Hideo Kodama nedokázal zajistit dostatek finančních prostředků na financování svého projektu, což mělo zapříčinění zamítnutí jeho žádosti o patent po uplynutí roční lhůty na dokončení úplné patentové specifikaci. I přes neúspěšného podání patentu se dostala do popředí myšlenka o rychlém vytváření prototypů na základě vytvrzování fotocitlivé pryskyřice UV zářením, a položila tak základy technologii nyní známé jako SLA [12; 13].

Podobně jako Dr. Hideo Kodama dopadla trojice francouzských inženýrů Jean-Claude André, Alain le Méhauté a Olivier de Witte. Alain le Méhauté pracoval na výzkumu zabývajícím se fraktální geometrie a stál před problém nedůvěry svých kolegů ohledně jeho výzkumu,

a proto se rozhodl podložit myšlenku svého výzkumu modelem fraktálního objektu splňující předpoklady jeho práce. Zde ale narazil na problém se sestrojením takového modelu, jelikož nebyla žádná technologie, kterou by dokázal takový model sestrotit. Olivier de Witte v tu dobu pracoval s myšlenkou vytvrzení kapalného monomeru na pevnou látku pomocí laseru a po tom co mu Alain le Méhauté sdělil svůj problém se rozhodl s ním spolupracovat. Později se k nim připojil Jean-Claude André a požádali roku 1984 o patent této technologie. Výzkumné centrum CNRS, které mělo celý projekt financovat, jejich výzkum nehodlalo dále finančně dotovat, neboť se domnívali, že tato technologie nebude mít žádné uplatnění a trojice musela tak od výzkumu upustit. Patent na technologii stereolitografie (SLA), který byl zamítnut, podali tři týdny před Chuckem Hullem, který podal patent na stereolitografický přístroj [12; 13].

Chuck Hull jako první úspěšně získal patent na technologii stereolitografického přístroje, který podal roku 1988 a následně roku 1990 byl publikován. Pracoval ve společnosti využívající ultrafialových lamp k vytvrzování nátěru. Kvůli zdoluhavé výrobě malých dílů určených k prototypování nových výrobků se rozhodl Chuck Hull přijít s novým způsobem výroby, který by zdatně zkrátil čas výroby a umožnil tak větší produktivitu. Vytvrzování nátěru UV lampou v něm iniciovalo použít myšlenku tento princip aplikovat opakovaně a UV záření soustředit do míst, v kterých by měl vzniknout model. Tuto myšlenku přednesl společnosti, ve které pracoval, a ta se rozhodla jeho myšlenku podpořit a financovat. Po prvním úplném vytisknutí modelu stereolitografickým přístrojem se rozhodl roku 1984 podat patent na přístroj sloužící k výrobě trojrozměrných objektů užitím stereolitografie. Po publikaci patentu založil vlastní společnost 3D Systems za účelem obchodního využití stereolitografie. V roce 1988 společnost 3D Systems uvedla na trh svou první 3D tiskárnu SLA-1 (obr. 3), která využívala tisk technologii SLA [13; 14; 15].



Obr. 3 První komerčně prodávána 3D tiskárna SLA-1 [16].

Další významný posun 3D tisku učinil roku 1988 Carl Deckard, který vynalezl technologii selektivního laserového spékání (SLS). Jeho cílem bylo vynaleznout technologii, která by sloužila k vytváření tvarově složité díly, aniž by muselo být použito technologie odlévání. Díky podpoře Texaské univerzity v Austinu a pomoci Dr. Joe Beamana dokončil svůj výzkum a patentoval technologii SLS [12; 13].

Scott Crump se jako další zapsal mezi ty, jenž výrazně přispěli k popularizaci 3D tisku objevem nové technologie aditivní výroby. Použitím tavné pistole, kterou naplnil kombinací vosku ze svíček a polyethylenu, vytvořil 3D objekt. Tento proces pak následně automatizoval připojením k tříosému portálovému robotu. Na roztavený materiál po vychladnutí byla nanášena další vrstva roztaveného materiálu a vznikala tak objekt vrstvu po vrstvě. Tuto technologii nazval Fused Deposition Modeling (FDM) a podal na ni patent roku 1989, který byl následně v roce 1992 publikován a téhož roku založil společně se svou manželkou společnost Stratasys, která vlastní na FDM ochrannou známku. Po vypršení patentu v roce 2009 byla založena spousta firem například Ultimaker nebo česká firma Prusa Research, které využívají tuto technologii, což mělo za přičinění poklesu cen 3D tiskáren s touto technologií. Jelikož Stratasys vlastní ochrannou známku na FDM, tak je tato technologie taky označována jako FFF (Fused Filament Fabrication) [12; 13; 17].

## 2 MATERIÁLY PRO 3D TISK

Nedílnou součástí 3D tisku jsou materiály, jejichž volba spočívá z velké části na technologii zvolené pro výrobu modelu. Materiály se vyskytují ve formě jemného prášku, tiskové struny nebo v tekutém stavu (resiny). Nejpoužívanější a nejrozšířenější skupinu materiálů tvoří plasty, a to buď termoplasty nebo reaktoplasty, které jsou ve formě granulátu nebo tiskových strun, které se označují slovem filament. Kovové materiály se používají převážně jakožto jemné prášky, ovšem některé firmy se specializují na prodej kovových tiskových strun. Resiny jsou fotocitlivé pryskyřice převážně užívané k technologii SLA a jedná se o fotopolymery tuhnoucí díky osvětlení UV světlem [3].

### 2.1 Polymery

Plasty neboli polymery jsou rozdílné od kovů především svou strukturou a vlastnostmi. Do skupiny plastů se řadí všechny makromolekulární látky (uměle vytvořené a přírodní) tvořeny makromolekulárními řetězci, které buďto jsou nebo nejsou mezi sebou spojeny chemickými vazbami. Plasty jsou taktéž tvořeny aditivou sloužící k úpravě vlastností makromolekulární látky. Oproti kovům mají plasty nižší měrnou hmotnost, dobré kluzné vlastnosti, tlumí rázy a vibrace, horší tvarovou a rozměrovou stálost [18].

Uměle vytvořené, taky označované jako syntetické, polymery se vytváří chemickou reakcí monomerů. Tento proces se nazývá polyreakce dělí se na polymeraci, polykondenzaci a polykondenzaci, tyto reakce uhlovodíků se liší svým způsobem vzniku polymeru. Reakce se opakují do doby než z původního monomeru, který musí mít schopnost vytvářet chemické vazby, vznikne polymer [18; 19].

Polymery se dělí do dvou skupin podle jejich chování za zvýšené teploty na termoplasty a reaktoplasty (termosety). Termoplasty se s rostoucí teplotou stávají plastickými, což dovoluje jejich další opracování a tvarování následně po vychladnutí ztuhnou. Jejich makromolekulární řetězce jsou lineární nebo rozvětvené. Reaktoplasty lze tvarovat při výrobě a při dalším ohřevu tuhnou a nelze je opětovně tvarovat, jelikož ztrácí svou plastičnost. Makromolekulární řetězce jsou zde tvořeny síťovanými řetězci [18; 19].

Nejpoužívanějšími polymery pro 3D tisk jsou:

- **PLA (kyselina polyléčná)** často označovan jako bio plast, neboť se vyrábí z obnovitelných zdrojů jako jsou kukuřičný škrob nebo cukrová třtina. PLA filamenty jsou nejčastěji používány k tisku technologií FDM převážně u začínajících tiskařů. Jedná se o materiál pro jakoukoliv geometrii modelu a s nízkými pořizovacími náklady. Při tisku nezapáchá a lze jej tisknout například ve společných prostorách bez jakéhokoliv ovlivnění okolí. Výhodou PLA je v porovnání s ostatními polymery nízká teplotní roztažnost, díky čemuž se má minimální sklon kroutit se během chladnutí. Tvrdost materiálu je doprovázena jeho křehkostí a při namáhání dochází k prasknutí. Velkou nevýhodou PLA filamentů je nízká teplotní odolnost a měkne už při teplotách okolo 50–60 °C a postprocessing je zde obtížnější, neboť měkne i při strojním broušením ale dá se tomu předejít chlazením během procesu. Výtisky by se měly skladovat v suchém prostředí kvůli tendenci PLA materiálu pohlcovat vlhkost, kvůli které ztrácí pevnost. Díky svému složení je snadno recyklovatelný rozpuštěním v hydroxidu sodném. PLA se vyrábí i ve více variantách jako například Magnetic Iron PLA, PLA svítící ve tmě nebo PolyTerra PLA. Vlastnosti PLA filamentů a cenové porovnání od různých výrobců viz příloha P2 [3; 17; 20].
- **ABS (akrylonitrilbutadienstyren)** amorfni termoplastický polymer dříve určen pro vstřikovací lisu se stal jedním z prvních materiálů používaných pro FDM technologii. Vyznačuje se lepší odolností vůči kyselinám, hydroxidům, vlhkosti, UV

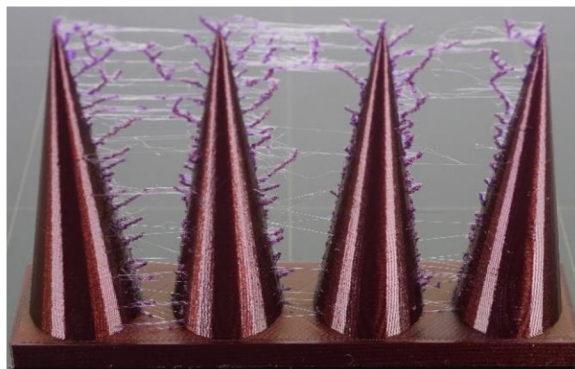


záření a mechanickému poškození než PLA. Jelikož je ABS ropný produkt a při jeho tisku nebo zahřívání unikají škodlivé částice, které jsou zdraví škodlivé, tak je doporučeno tisknout v místnostech s cirkulací vzduchu. Proto filamentsy ABS není vhodné užívat ve zdravotnictví. Při tisku, obzvláště rozměrnějších modelů, je nezbytné používat využívat vyhřívané podložky, popřípadě uzavřené tiskové komory za účelem menších teplotních rozdílů mezi jednotlivými vrstvami tisku. Vyšší teplotní rozdíly by mohly způsobit smrštění, praskliny nebo odlepení rohů modelu od desky (obr. 4), protože ABS je velice citlivý na změny teploty. Výtisky z ABS lze chemicky vyhladit na souvislý povrch a snadno opracovat. ABS se vyskytuje na trhu i ve více variantách například ABS+, ABSi nebo ABS – T. Vlastnosti ABS filamentů a cenové porovnání od různých výrobců viz příloha P3 [17; 20].



Obr. 4 Vady výtisku vzniklé teplotními rozdíly [17].

- **PET-G (polyethylentereftalát – glykol)** je upravená forma PET vzniklá modifikací během polymerizace přidáním glykolu. V dnešní době se PET využívá v 3D tisku velice ojediněle, jelikož se obtížně tiskne a výtisky jsou křehké, pro byl vyvinut PET – G, který má větší odolnost vůči nárazu a smrštění. Díky výborné přilnavosti vrstev má materiál minimální tendenci se během tisku smršťovat a kroutit. Výhodou PET-G oproti PLA a ABS je vyšší chemická odolnost. Při tisku nemá výraznou pachovou stopu a je zdravotně nezávadný a lze jej recyklovat. Výtisky jsou pevné, houževnaté, neabsorbují vlhkost a mají hladký a lesklý povrch. Nevýhodou PET-G je velká přilnavost k podložce a při odstraňování výtisku z podložky může dojít k poškození výtisku nebo podložky, pokud není podložka řádně připravená k tisku. U tisku může dojít ke stringování neboli odkapávání filamentu (obr. 5), které je obtížné odstranit během tisku a odstraňuje se až po vytisknutí nebo před tiskem úpravou retrakce (vtahování filamentu do trysky) a snížení teploty trysky. Vlastnosti PET-G filamentů a cenové porovnání od různých výrobců viz příloha P4 [17; 20].



Obr. 5 Nežádané odkapávání filamentu během tisku [21].

- **Nylon (polyamid)** se v 3D tisku vyskytuje pod dvěma názvy, a to buď jako Nylon nebo jako PA (Polyamid). Nylon pochází už z 30. let 20. století a jeho název je složen ze dvou názvů měst, New York a Londýn. Jedná se o velice pevný a částečně pružný materiál s vysokou mechanickou, chemickou a teplotní odolností. Výtisky z nylonu jsou na rozdíl od výtisků z jiných polymerových materiálů odolné vůči abrazi a má nízký součinitel smykového tření 0,15-0,25. Díky těmto vlastnostem se nylon převážně využívá na mechanické součástky (obr. 6). Nevýhodou je vysoká náchylnost na vlhkost a je doporučeno skladovat nylonové filamentsy a součástky v uzavřených nádobách s odvlhčovačem, jelikož pokud by nebyl filament dostatečně suchý mohly by během tisku vniknout na výtisku bublinky. Nylon se pohybuje ve vyšší cenové relaci oproti například PLA nebo ABS a používají ho převážně pokročilejší tiskaři. Prodává se ve variantách například Nylon FX256, Nylon PA12 nebo Nylon PA12-CF, který obsahuje uhlíková vlákna. Vlastnosti PA filamentů a cenové porovnání od různých výrobců viz příloha P5 [17; 20; 22].



Obr. 6 Ozubená kola vyrobená z nylonu [23].

## 2.2 Resiny

Technologie 3D tisku, které se zabývají tiskem pomocí stereolitografie využívají jako materiál pro tisk resiny. Jsou to fotocitlivé materiály vyrobeny z přírodní pryskyřice, tudíž je lze označit za fotopolymery tuhnoucí pod UV světlem. Na rozdíl od filamentů, které lze použít u jakékoliv FDM tiskárny od libovolného výrobce, tak při nákupu resinu je důležité, aby vlnová délka, při které tuhne spadala do rozsahu vlnových délek, kterými disponuje tiskárna [20].

Resiny nejsou tak jako filamentsy rozlišovány na základě složení např. PLA, ABS nebo PA ale jsou rozlišovány podle účelu použití a jsou tvořeny základním materiálem vylepšeným o různá aditiva. Základem resinu je jádro, které je tvořeno oligomery a monomery, další složkou tvoří fotoiniciátory, které slouží k iniciaci tuhnutí za použití UV světla. Poslední složkou jsou aditiva, které nejvíce mění vlastnosti resinu, a to ať už jejich barvu nebo mechanické vlastnosti. Vlastnosti resinů se liší od typu použitého resinu viz tab. 1 [3; 24].

Při používání resinů by mělo být dbána větší pozornost na manipulaci s nimi, jelikož při tisku vytváří zdraví nebezpečné výpary z tohoto důvodu by měl tisk probíhat zásadně v místnostech s cirkulací vzduchu a resin nesmí dojít ke kontaktu s kůží nebo očima, jelikož by u některých lidí mohl vyvolat alergickou reakci. Resiny se skladují při pokojových teplotách, aby nedošlo ke změně viskozity a temných místnostech, jelikož některé resiny se vytvrdí i při slunečním svitu [3; 24].

Tab. 1 Typy resinů a jejich vlastnosti [24].

Typ resinu	Vlastnosti
Standardní resin	Hladký povrch, hodně detailů Křehký Nevhodný pro mechanické části
Čirý resin	Poloprůhledný Může se stát téměř plně průhledným po následném zpracování
Odlévací resin	Hodně detailní Skvělý pro přípravu odlévacích forem Malé až žádné zbytky po vypálení resinu
Tvrdé a odolné resiny	Podobné ABS nebo PP materiálům Částečně pružné Vhodné pro mechanické části Nízká odolnost vůči vysokým teplotám
Žáruvzdorné resiny	Odolné vůči vysokým teplotám Používané pro injekční formy Drahé
Biokompatibilní resiny	Netoxické Vhodné pro výrobu dentálních implantátů Odolné proti otěru Drahé
Flexibilní resiny	Podobné gumě (tvrdost 70A) Nižší rozlišení detailů tištěných částí

### 2.3 Kovy

Nedílnou součástí 3D tisku tvoří kovové materiály, převážně tedy ve formě prášku nebo jako filameny, které jsou tvořeny kombinací polymeru a kovového prášku. V dřívějších dobách nebyl tisk kovu tak využíván a rozvinutý jako je tomu teď, neboť kvůli vysokým pořizovacím nákladům za tiskárny si jej nemohla většina firem dovolit. Nyní je 3D tisk kovu uplatňován především při výrobě dílů, které není možno vyrobit klasickými způsoby obrábění, a to zejména u dílů s vnitřními strukturami nebo za účelem úspory materiálu, času potřebného na výrobu, popřípadě zvýšení efektivity výroby [25].

Pro tisk technologií FDM se používají polymerová vlákna v příměsi s kovovým práškem. Tato kombinace způsobuje kovový vzhled výtisku a zlepšuje jeho mechanické vlastnosti. Nevýhoda těchto filamentů je abrazivnost kovového prášku, který způsobuje opotřebení trysky a lze ji eliminovat užitím trysky z tvrzené oceli. Technologie FDM často vyžaduje použití podpor, které mohou omezit geometrii výtisku [25].

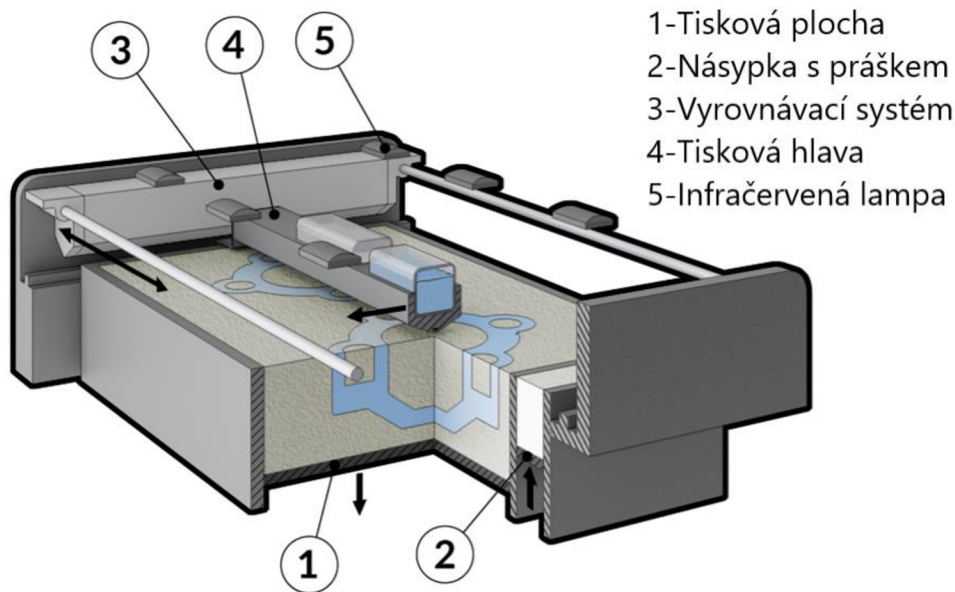
Nejvíce své uplatnění nacházejí kovy ve formě jemného prášku naneseného na pracovní plochu a spečeného laserovým paprskem v místech požadované vrstvy modelu. Tento princip využívá například technologie DMLS, která je podrobněji popsána v kapitole 3.5. Vlastnosti výtisku se odvíjí od kvality prášku a od mechanických vlastností materiálu, ze kterého je prášek vytvořen. Materiály prášku jsou například titanové slitiny (Ti6Al4V), hliníkové slitiny (AlSi10Mg), nerezové oceli (SS316L), niklové slitiny (Inconel 718) nebo drahé kovy zlato a stříbro [25; 26].

### 3 TECHNOLOGIE 3D TISKU

Počet technologií užitých při aditivní výrobě je velice rozsáhlý, neboť 3D tisk je poměrně mladou technologií a stále se rozrůstá množství používaných metod výroby a počet materiálů, které se při 3D tisku využívají. Většina prototypů vzniká pomocí principu vytlačování vrstev materiálu, slinováním prášku, lepením nebo vytvrzováním. Díky tomu lze pro výrobu prototypu určit technologii, která bude nejefektivnější a časově nejméně náročná [27].

#### 3.1 MJF (Multi Jet Fusion)

V roce 2014 uvedla na trh společnost HP, která je známá především v oblasti informační technologie výrobou tiskáren, scannerů a digitálními zařízeními, průmyslovou technologii 3D tisku metodou spékání zrněk plastového prášku (obr.7). Technologie MJF využívá pro spékání prášku infračervené záření v kombinaci s rozprašovaným inkoustem jako pojidlem, který napomáhá prášku absorbovat infračervené světlo. Na začátku procesu se rovnoměrně zahřeje prostor, na který bude prášek nanášen. Následně je prášek vytlačen z násypky a po celé tiskové ploše je rozmístěna jemná vrstva prášku vyrovnávacím systémem. Tisková hlava nanese spojovací činidlo v požadovaném tvaru dané vrstvy a po vnějším obvodu je zároveň nanášeno činidlo, které zajišťuje hladký povrch výtisku. Infračervená lampa následně vytvrdí místa postříkaná spojovacím činidlem. Po vytvrzení se celý proces opakuje vrstvu po vrstvě, dokud není dosaženo požadovaného výtisku. Před zahájením dodatečných úprav výtisku je nutné výtisk nechat vychladnout a odstranit zbytkový prášek [28; 29].



Obr. 7 Součásti MJF tiskárny [30].

Pro tisk technologií MJF se nejčastěji používá materiál TPU (termoplastický polyuretan) vyznačující se svou pružností nebo PA 12 (polyamid) s nízkou porózností a vysokou hustotou. Díky materiálům s jemnými zrny lze dosáhnout tloušťky vrstvy 0,08 mm. Technologie nabízí možnost plnobarevného tisku, ovšem díky lepší absorpci infračerveného záření je upřednostněn černý filament. Výtisky MJF technologií jsou izotropní, a tudíž jsou jejich fyzikální vlastnosti v různých směrech stejné. Na rozdíl od jiných technologií tisku u technologie MJF si materiál zachovává svou pružnost v kombinaci s vysokou pevností a nejsou tak nutné podpůrné struktury. Díly musí být z důvodu zbytkového prášku opatřeny otvory, aby bylo možné prášek vysypat z dutin [28; 31].

Technologie MJF je patentována společností HP, která je jediným výrobcem MJF tiskáren, a tak pro ni na trhu není žádná konkurence což má zapříčinění vysoké pořizovací náklady, řádově miliony Kč, MJF tiskáren a díky tomu jsou spíše využívány pro průmyslovou produkci. MJF využívá 80–85 % zbytkového prášku k dalšímu tisku, kdežto technologie SLS pouze 50 %. MJF tiskárny najdou své uplatnění především v malosériové výrobě, kde by se nevyplatilo vyrábět nákladné formy pro vstřikování plastů, a při výrobě prototypů pro zkoušky vhodnosti, tvaru a funkčnosti, jelikož jsou jejich mechanické vlastnosti srovnatelné s díly vyrobenými vstřikováním do formy (obr.8) [28; 29; 31].



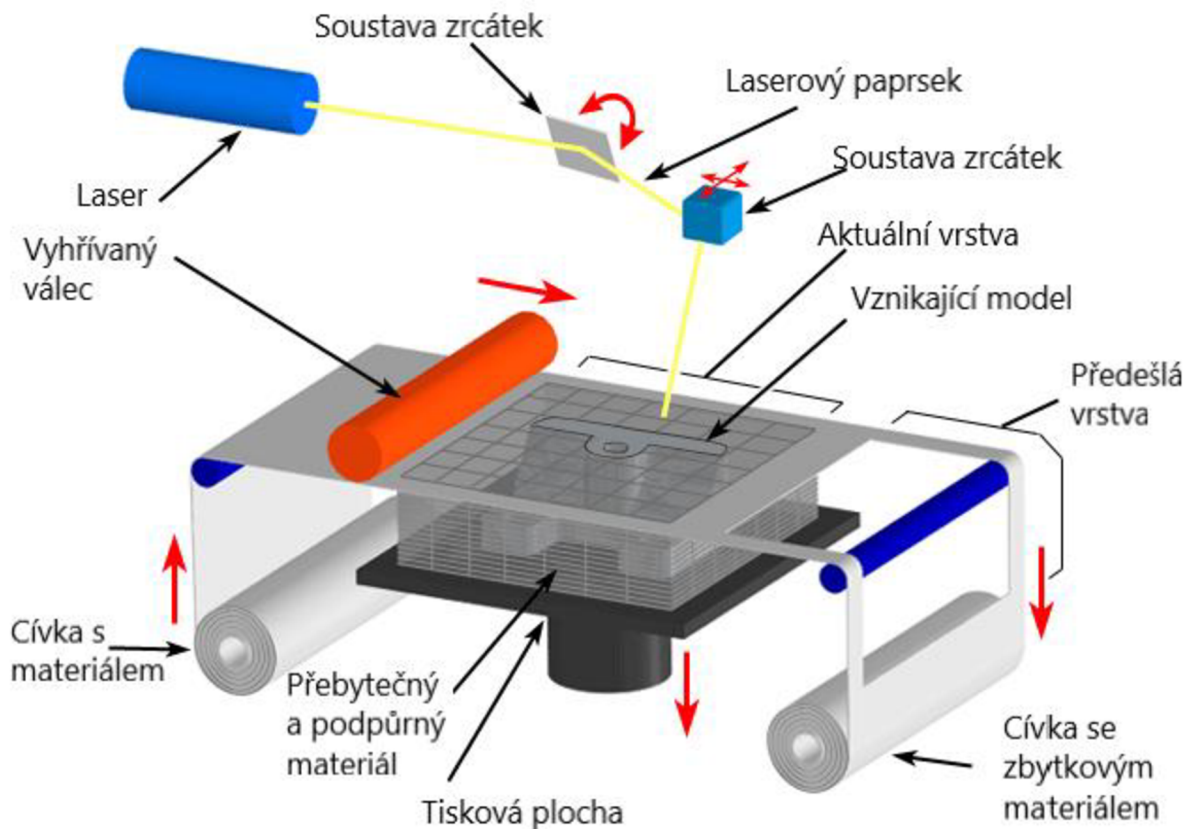
Obr. 8 Prototypy vyrobené technologií MJF [30].

### 3.2 LOM (Laminated Object Manufacturing)

Technologie LOM byla vyvinuta společností Helisys Inc., která dodala na trh roku 1991 první komerční technologii výroby laminovaných trojrozměrných objektů. Výroba je založena na postupném nanášení vrstev fólií na tiskovou plochu a jejich vyřiznutí (obr.9). Nalepení jednotlivých vrstev je zajištěno přílnavým nátěrem na jedné straně fólie a pomocí zahřátého válce, jenž aktivuje pojivo nanesené na spodní straně fólie, která následně přilne na předchozí vrstvu. Použitím laseru je vyřezán obrys součásti v jednotlivých vrstvách, následně po dokončení řezu je snížena tisková plocha o tloušťku fólie, na kterou je nanesena další vrstva fólie, která je opět pomocí vyhřívaného válce přilepena. Celý proces se opakuje vrstvu po vrstvě, dokud není dosaženo požadovaného výtisku. V průběhu tisku je přebytečný materiál rozřezáván na kvádry, které jsou po dokončení tisku odstraněny společně s podporami pomocí dláta či tenkého drátu. Po dokončení tisku a odstranění přebytečného materiálu je součást připravena na dokončovací operace a povrchové úpravy, mezi které se řadí pokrytí povrchu součásti uretanovým, epoxidovým nebo silikonovým nástřikem z důvodu zabránění roztažnosti součásti vlivem vlhkosti. Nejpoužívanějšími materiály v technologii LOM jsou fólie z papíru nebo plastu namotané na cívce [27; 32; 33].

Tisk technologií LOM je díky své nízké nákladovosti na výrobu určen převážně pro tvorbu modelů určených pro marketingové prezentace, vizualizaci nebo tvorbu forem pro vstřikovací a odlévací technologie. Použitím laseru vzniká přesný model s vysoce kvalitním povrchem.

Nevýhodou technologie LOM je velké množství zbytkového materiálu, nízká pevnost modelu způsobena použitím pojiva mezi vrstvy fólie, nebezpečí poškození předešlé řezané vrstvy laserem a možnost poškození modelu odstraňováním podpor [27; 33].

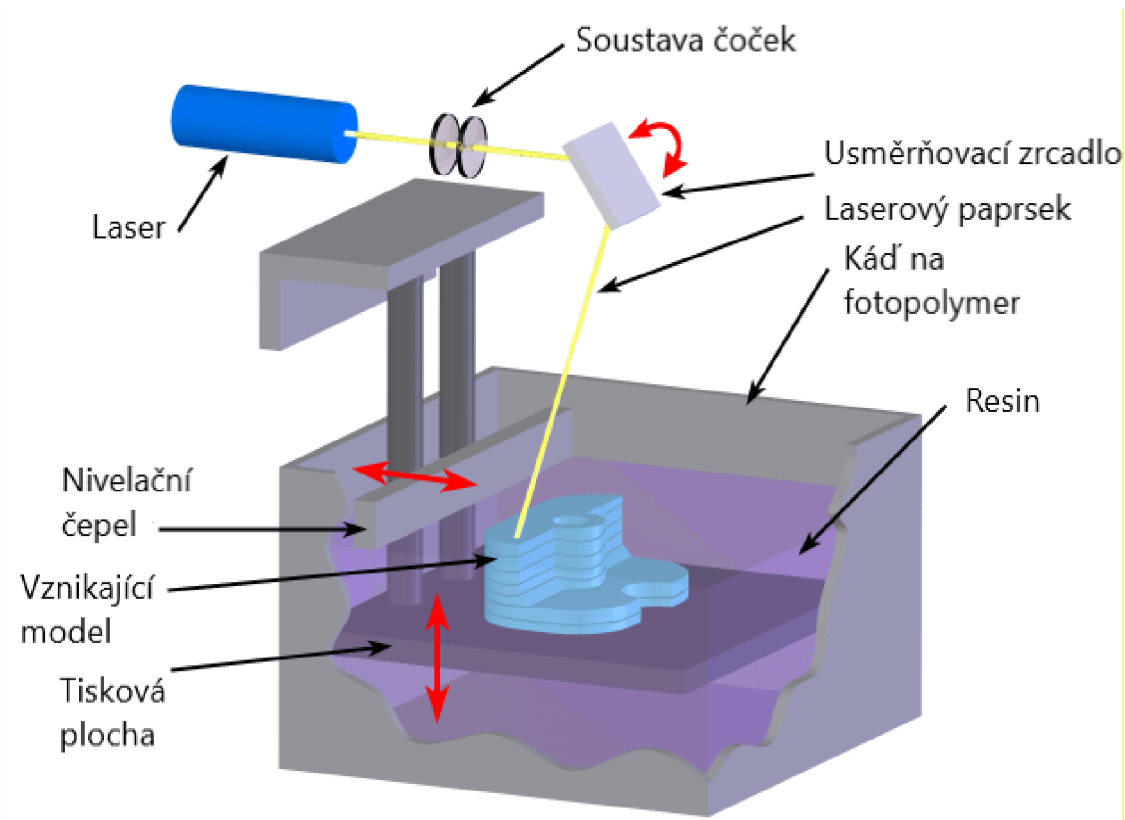


Obr. 9 Průběh tisku technologií LOM [32].

### 3.3 SLA (Stereolitografie)

Roku 1984 byl podán patent na stereolitografický přístroj Chuckem W. Hullem, který přišel s myšlenkou vytvrzování tekutého fotopolymery UV zářením, a vytvářením tak trojrozměrných objektů. Celý princip SLA tisku je založen na fotopolymraci neboli vytvrzování fotocitlivého materiálu (polymerní pryskyřice) polymeračním světlem [14; 27].

SLA tiskárny pracují na dvou principech vytahování pracovní plochy nebo na principu ponořování pracovní plochy do tekutého fotopolymery. V prvním případě je pracovní plocha na začátku procesu zcela ponořena do nádoby s fotopolymery, který je postupně vytvrzován laserem přes soustavu čoček a zrcátek sloužících k usměrňování laseru do míst, v kterých má dojít k vytvrzení. Po zhotovení první vrstvy je pracovní plocha vytažena směrem vzhůru o velikost jedné vrstvy pohybující se v rozmezí od 0,01 až 0,15 mm. Celý proces se opakuje vrstvu po vrstvě, dokud není model zhotoven. Dno nádoby je z průhledného, nepřilnavého a tepelně odolného materiálu (teflonu) aby nedošlo k přilepení vytvrzeného materiálu ke dnu nádoby. Při nesprávné orientaci modelu může dojít odtrhnutím modelu od dna nádoby k poškození výtisku. V druhém případě je pracovní plocha postupně ponořována do nádoby s tekutým fotopolymery (obr. 10). Laserový paprsek zde působí shora a působí v místech, kde má dojít k vytvrzení modelu. Po dokončení jedné vrstvy modelu se pracovní plocha společně s modelem ponoří o velikost jedné vrstvy do tekutého fotopolymery. Následně proběhne vytvrzení další vrstvy a celý proces se opakuje [14; 27; 34].



Obr. 10 SLA tiskárna s principem ponořování tiskové plochy [35].

U technologie SLA existují tři způsoby osvitů (obr. 11), které mají za následek rozdílnou kvalitu a dobu tisku. První způsob osvitů laserem byl již nastíněn v předešlé části. Doba tisku jedné vrstvy se odvíjí od velikosti plochy, která má být vytvořena v dané vrstvě. Osvětlení DLP (Digital Light Processing) je zprostředkováno digitálním projektořem na celou tiskovou vrstvu najednou, díky čemuž je nezávislá doba tisku jedné vrstvy na počtu tištěných modelů a jejich ploše. Osvětlení MSLA (Mask Stereolithography) pracuje s LCD displejem umístěným přes celou tiskovou plochu, který propouští UV záření jen v místech, kde má dojít k vytvoření fotopolymeru. Rozlišení modelu je dáno rozlišením LCD displeje. Stejně jako u DLP je tisk časově nezávislý na počtu tištěných objektů a tiskový čas jedné vrstvy je neměnný [3].



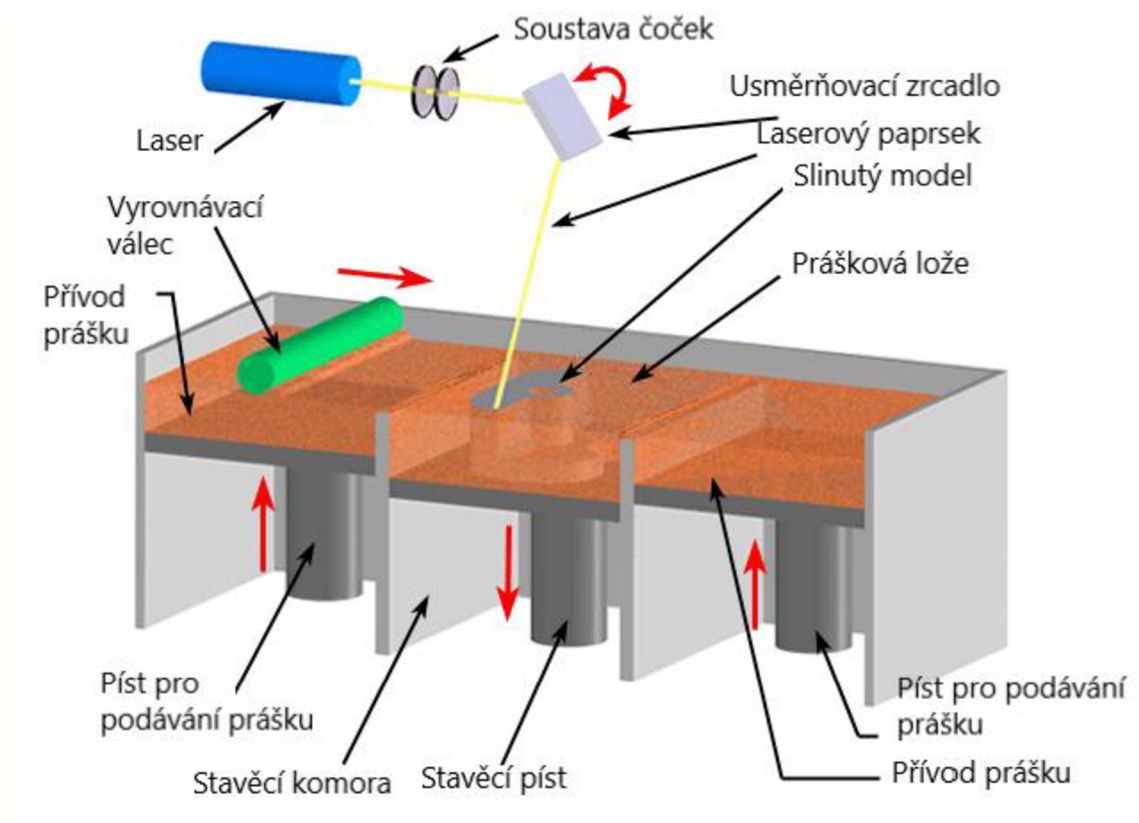
Obr. 11 Způsoby osvětlení SLA technologie [3].

Technologie SLA vyniká svou výbornou přesností od 0,05 až 0,2 mm na 100 mm délky modelu a možností tisku objemnějších modelů díky čemuž najde uplatnění především při výrobě forem pro vstřikování, lití a k výrobě modelů s přesnými detaily nebo malými otvory. Přední nevýhodou technologie SLA je omezení výběru materiálu pouze na fotocitlivé materiály, které musí být po tisku dotvrzeny za účelem zlepšení mechanických vlastností [27; 33].

### 3.4 SLS (Selective Laser Sintering)

Student Universty of Texas v Austinu Carl Deckard a jeho akademický poradce Dr. Joe Beaman vynalezli a roku 1988 patentovali technologii 3D tisku založenou na principu spékání práškových materiálů za použití vysoce výkonného laseru. Technologie SLS (obr. 12) na rozdíl od technologie MJF, která je založena na stejném principu, používá CO<sub>2</sub> laser generující infračervené záření, který pracuje v komoře vyplněné inertním plynem (dusíkem) z důvodu zamezení oxidace. Na začátku procesu je na tiskovou plochu nanášena vrstva velmi jemného prášku pomocí válečkového mechanismu. Následně pak laser zahřeje prášek na jeho teplotu tání v požadovaných místech modelu, čímž dojde k jeho spékání. Nespečený okolní prášek slouží jako podpora, a není tak potřeba dalších přidaných podpor. Následně po dokončení první vrstvy je tisková plocha posunuta o tloušťku jedné vrstvy níže a celý proces se opakuje. Po dokončení všech vrstev se na hotový výrobek nanese několik centimetrů prášku za účelem zajištění rovnoměrného chladnutí. Po vychladnutí je model vyjmut ze zařízení a následuje post processing nabízející bohatou škálu povrchových úprav, jako je například leštění, broušení, otryskávání nebo model lze obrábět totožnými způsoby jako kovový materiál [27; 36; 37].





Obr. 12 Technologie SLS [38].

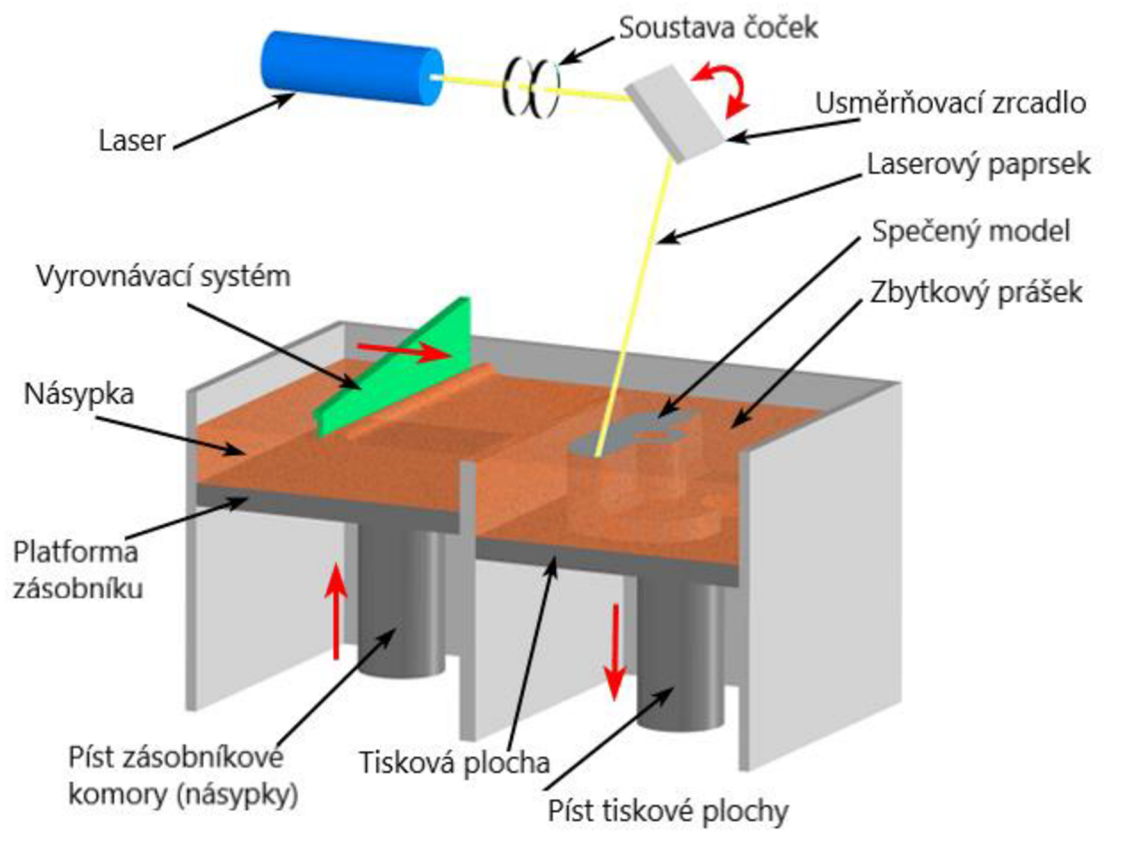
Při tisku technologií SLS lze použít polymery obohacené o sklo, hliník nebo uhlíková vlákna, dále lze použít kov, pryž, keramika, a to vše ve formě velmi jemného prášku s částicemi o velikosti od 20  $\mu\text{m}$  až po 100  $\mu\text{m}$ . Výhodou této technologie je možnost vytvářet velké modely s komplexní geometrií nebo funkční části s dobrými mechanickými vlastnostmi nebo také možnost opětovného využití přebytečného materiálu. Mezi nevýhody se řadí vysoká pořizovací cena tiskárny, energetická náročnost na provoz tiskárny, pórovitost povrchu modelu a velmi náročná výměna materiálu, jelikož je nutno tiskárnu dokonale celou vyčistit, a proto firmy využívají pro jeden druh materiálu jednu tiskárnu [27; 33; 39].

Podle materiálu použitého při tisku lze technologii SLS rozdělit na metody [27]:

- Laser slinování – plast,
- Laser slinování – kov,
- Laser slinování – slévárenský písek,
- Laser slinování – keramika (přímé odlévání výroby skořepin).

### 3.5 DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Technologie DMLS (obr. 13) je založena na principu postupném tavení kovového materiálu ve formě prášku laserovým paprskem. Technologii DMLS vyvinula německá společnost EOS GmbH (Electro–Optical Systems) v kooperaci se společností Rapid Product Innovations (RPI) roku 1994 za účelem vyvinutí metody pro rychlou výrobu kovových prototypů. Kovový prášek se nachází v násypce, která je součástí tiskárny, nebo v externí násypce, ze které je pístem podáván do pracovní komory kde je rovnoměrně nanášen na tiskovou plochu vyrovnávacím systémem s keramickým břítem. Tloušťka jedné vrstvy nanesené na tiskovou plochu je v rozmezí 0,02 až 0,1 mm [40; 41].



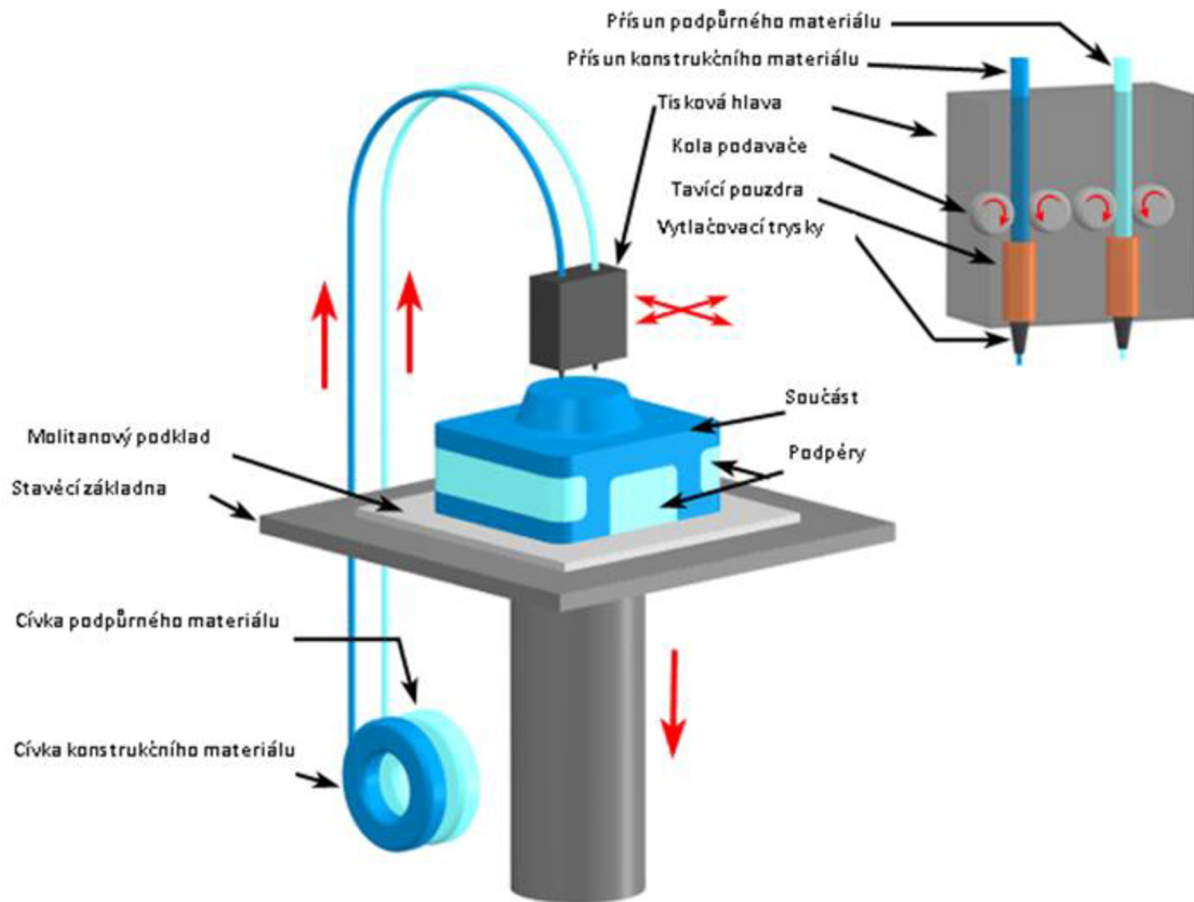
Obr. 13 Technologie DMLS [41].

Laserový paprsek působící na materiál ho lokálně zahřeje na jeho teplotu tání čímž speče zahřívanou vrstvu materiálu s předešlou ztuhlou vrstvou. Lasery používající se při technologii DMLS dosahují síly paprsku až 1kW pracují v interní atmosféře zabraňující oxidaci. Interní atmosféru tvoří dusík nebo argon, jejichž volba je závislá od použitého materiálu. Po ztuhnutí nové vytvořené vrstvy je tisková plocha snížena o tloušťku nové vrstvy a proces se opakuje, dokud není zhotoven model. Zbytkový prášek může být opětovně použit. Podpory tvoří stejný materiál jako model a jsou následně odstraněny manuálně v průběhu postprocessingu, který zahrnuje tryskání, broušení nebo obrábění [40; 41].

Technologie DMLS ve srovnání s technologií SLS dosahuje vyššího rozlišení detailů, jelikož využívá prášek s jemnějšími zrny. Využívá se k výrobě lékařských implantátů, leteckých dílů, funkčních prototypů, díly pro konečné užití nebo k výrobě dílů, které není možné vyrobit technologií SLS kvůli jejich složitosti. Materiály viz příloha P6 obsahují široké spektrum železných i neželezných kovů bez použití příměsi pojiva díky čemuž výtisk má podobné nebo i stejné vlastnosti jako kov ze kterého je tisknut [40; 41].

### 3.6 FDM (Fused Deposition Modeling)

Prvenství v oblasti 3D tisku, co se týká rozšířenosti a dostupnosti, zaujímá technologie FDM (obr. 14). V literatuře a internetových článcích je často technologie FDM označována jako technologie FFF (Fused Filament Fabrication), mezi těmito technologiemi je rozdíl pouze v jejich označení, jelikož FDM je ochranná známka výrobce 3D tiskáren Stratasys. Oblast použití FDM tiskáren zahrnuje převážně domácí využití ale také prezentační modely, prototypy a funkční modely. Oproti technologiím využívajících tiskový materiál ve formě prášku a pryskyřice, technologie FDM využívá jako tiskový materiál polymerové filameny, které nedosahují takových přesností a jsou na výtisku viditelné vrstvy tisku [3; 17].



Obr. 14 Technologie FDM [42].

Proces tisku je realizován kontinuálním dopravováním filamentu skrze extruder, kde dochází k ohřevu filamentu na teplotu tavení materiálu a následně jeho vytlačování skrze trysku. Podle zvolené tiskárny se taky odvíjí, zda budou podpory budovány ze stejného materiálu jako model (extruder s jednou tryskou) nebo z materiálu rozpustitelného v roztocích (extruder se dvěma tryskami) což má za následek usnadnění odstraňování podpor a rychlejší postprocessing. Následně po vytlačení skrze trysku dojde ke spojení nově vytvořené vrstvy s již předešle vytvořenou vrstvou. Následně se celý proces tisku opakuje vrstvu po vrstvě, dokud nedojde k vytištění kompletního výtisku [3; 17].

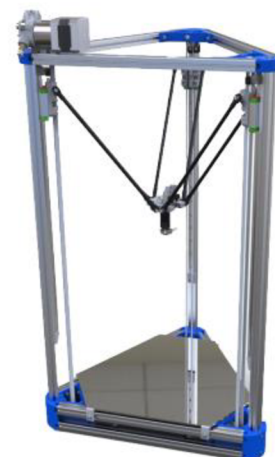
Tiskárny FDM jsou konstruovány z kinematického hlediska ve více variantách (obr. 15) a to kartézská, polární nebo delta tiskárna. Kartézská tiskárna využívá pohyb tiskové hlavy v osách X, Z a tisková plocha se pohybuje v ose Y. Polární tiskárna je založena na principu polárního souřadnicového systému to znamená, že tisková hlava se pohybuje v osách X, Z nad rotační tiskovou plochou. Poslední zmíněnou tiskárnou je delta disponující vysokou rychlostí tisku společně s větším rozsahem v Z-ové ose. Princip spočívá na extruderu zavěšeném na třech ramenech. Komponenty FDM tiskárny jsou detailněji popsány v kapitole, která se zabývá přípravou výrobního procesu soukolí [3].



Kartézská tiskárna



Polární tiskárna

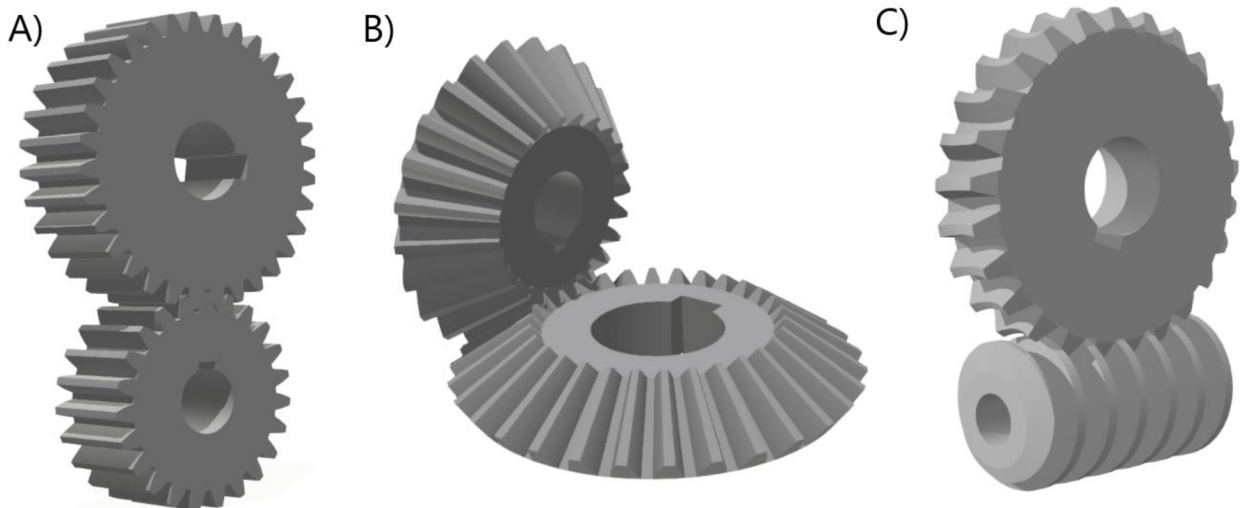


Delta tiskárna

Obr. 15 Konstrukce FDM tiskáren [3].

## 4 PARAMETRY OZUBENÝCH KOL

Ozubené převody sloužící k přenosu a transformaci výkonu jednoho hřídele na druhý za pomoci tvarového styku mezi dvojicí spoluzabírajících kol (hnacího a hnaného). Hnací kolo neboli pastorek přenáší točivý moment za konstantního převodového poměru na hnané kolo bez prokluzu. Jedná se o nejvíce používané převodové mechanismy, jelikož se vyznačují dlouhou životností, dobrou únosností, přesností a schopností přenášet vysoké výkony při vysokých otáčkách. Poloha os hřídelů ozubených kol může být rovnoběžná, různoběžná a mimoběžná (obr. 16). Díky těhle vlastnosti může být přenášen točivý pohyb hnacího hřídele na libovolně umístěný hnaný hřídel nebo pomocí jejich kombinace [43; 44].



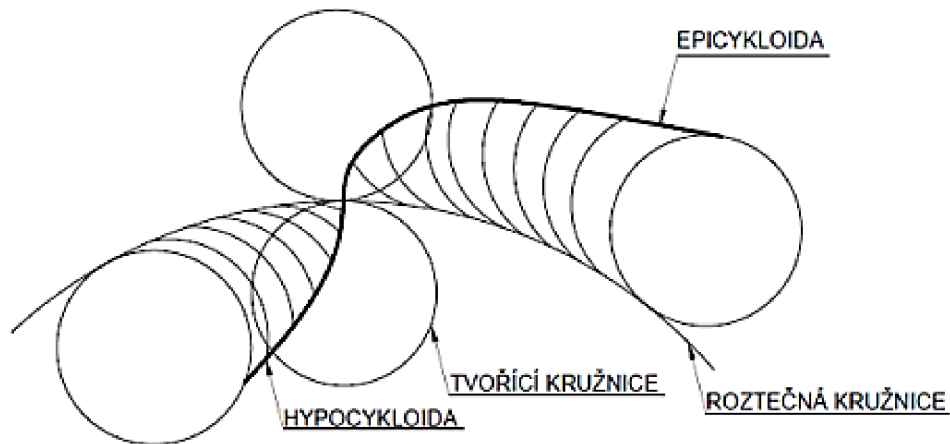
Obr. 16 Poloha os hřídelů A) rovnoběžná, B) různoběžná, C) mimoběžná.

### 4.1 Zubové profily

Užitím stejného zubového profilu u dvojice spoluzabírajících kol eliminuje nárazy při záběru a částečně tření a hluk vznikající při chod soukolí. Jeli převodový poměr konstantní vzhledem k poměru úhlových rychlostí, tak profily soukolí jsou označeny jako sdružené a ke každému profilu lze přiřadit sdružený profil. Nejčastěji vyskytujícím se profilem zubů ve strojírenství je evolventní ozubení a mezi další patří cykloidní nebo Wildhaber–Novikovo ozubení. Cykloidní a Wildhaber–Novikovo ozubení mají nevýhodu oproti evolventnímu ozubení v tom, že je nutné dodržet osovou vzdálenost a složitější výroba, proto se více uplatňuje použití evolventního ozubení [45; 46].

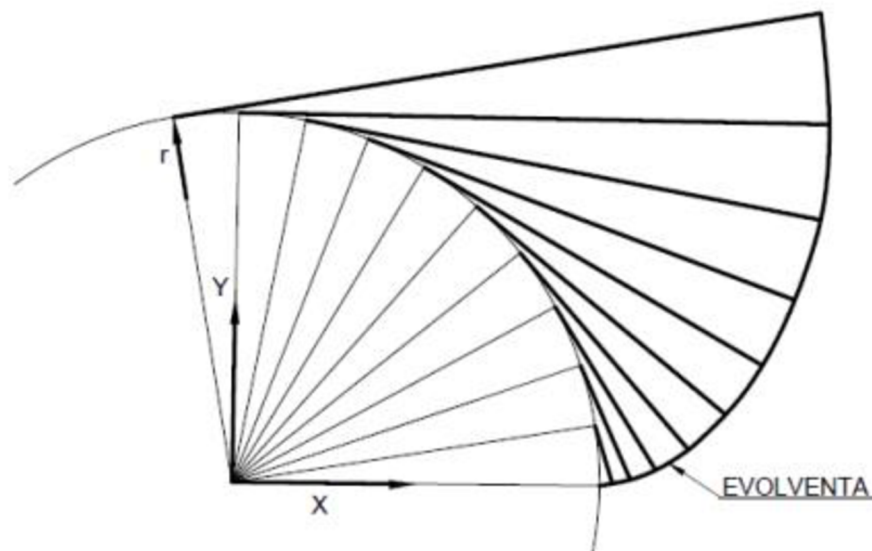
Typy zubních profilů:

- **Wildhaber–Novikovo ozubení** – taktéž nazýváno jako kruhový oblouk. Profil zubu jednoho ozubeného kola ze soukolí je tvořen konvexním kruhovým obloukem a druhé ozubené kolo je tvořeno konkávním kruhovým obloukem. Tento typ ozubení pracuje při malých rychlostech například reduktor válcovací stolice [46].
- **Cykloidní ozubení** – vzniká odvalováním pevného bodu tvořící kružnice po kružnici roztečné. Pokud se odvaluje tvořící kružnice po vnější straně roztečné kružnice, vzniká tak epicykloida a pokud se odvaluje po vnitřní straně, tak vzniká hypocykloida viz obr. 17. Hlava zubu u cykloidního ozubení má profil tvořen epicykloidní křivkou, kdežto pata zubu má profil hypocykloidní křivky. Dochází zde k menší míře opotřebení a tření, oproti evolventnímu ozubení, vlivem lepšího odvalování povrchu zubů po sobě. Cykloidní ozubení se především vyskytuje v hodinových a přesných mechanismů [27].



Obr. 17 Epicykloida a hypocykloida [27].

- **Evolventní ozubení** – je nejvíce využívaný typ ozubení ve strojírenství. Prvenství zaujímá převážně díky vlastnostem jako je necitlivost vůči úchylkám osové vzdálenosti, konstantní směr působení síly v ozubení a jednoduchost výroby vzhledem k předešlým dvěma profilům ozubení. Evolventní křivka vzniká odvalováním tvořící přímky po základní kružnici (obr. 18). Nevýhodou evolventního ozubení je nepříznivé rozložení tlakového napětí v patě zubu při záběru dvou konvexních profilů u vnějšího ozubení a taky možnost vzniku podřezání paty zubu při volbě malého počtu ozubení, které ovšem lze eliminovat korekcí ozubení. Tvar boků zubu se volí s ohledem na co nejprůzračnější kinematické a dynamické poměry, kterých lze dosáhnout volbou evolventního profilu zubů. Volbou evolventního tvaru boků zubů spolupřevládajících kol lze zajistit přesný a stálý převod a zamezení trhavým pohybům [27; 46].



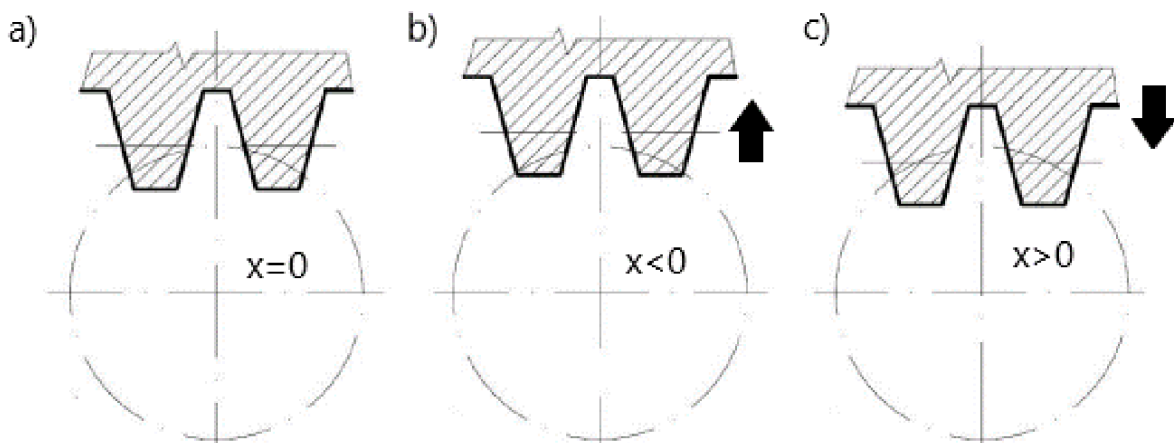
Obr. 18 Evolventní tvar boku zubu (prostá evolventa) [27].

## 4.2 Korekce evolventního ozubení

Pokud by u ozubení mohlo dojít k podřezání pat zubů, jenž by mělo za následek snížení pevnosti paty zubu, vlivem malého počtu zubů nebo v případě, kde se požaduje dosažení přesné osové vzdálenosti soukolí se provádí korekce ozubení. Korekcí lze taktéž eliminovat špičatost

zubu nebo vznik provozní a výrobní interference. V případě nežádoucích vlastností ozubení jako jsou špičatost a podřezání dochází k zmenšení součinitele záběru a dráhy záběru [27; 45].

Ozubení, u kterého se při výrobě dotýká roztečná kružnice kola s roztečnou přímkou hřebene je označeno jako soukolí typu N a je nekorigované. Pokud se ovšem roztečná kružnice nedotýká roztečné přímky, tak se jedná o korigované ozubení. Korekce se provádí posunutím výrobního hřebene o hodnot jednotkového posunutí základního profilu ( $x$ ). Jestliže směřuje posunutí výrobního hřebene do středu kola označuje se korekce jako  $+V$  a jde o kladnou korekci. Pokud je výrobní hřeben posunut od středu kola, jedná se o zápornou korekci, která se označuje  $-V$  (obr. 19). U soukolí typu VN dochází ke vzájemné korekci obou ozubených kol (pastorek  $+V$  a kolo  $-V$ ) [27; 45].



Obr. 19 Korekce ozubení a) nekorigované kolo, b) kladná korekce, c) záporná korekce [27].

### 4.3 Základní parametry

Základní charakteristikou ozubení je **modul** ozubení, jehož hodnoty jsou normalizovány dle ČSN 01 4608. Pomocí modulu se odvozuje velké množství parametrů ozubeného kola. Modul je část roztečné kružnice připadající na jeden zub. Aby došlo k záběru soukolí musí mít pastorek i kolo stejný modul [43].

Vztah pro výpočet modulu nekorigovaného i korigovaného ozubení [27]:

$$m = \frac{d}{z} = \frac{p}{\pi}, \quad (4.1)$$

kde:  $m$  - modul [mm],  
 $d$  - průměr roztečné kružnice [mm],  
 $z$  - počet zubů [-],  
 $p$  - rozteč [mm].

Vzdálenost dvou stejnohlých sousedních zubů naměřena na roztečné kružnici se označuje jako **rozteč**, která je rovněž dána součtem šířky zubu a šířky zubové mezery. Velikost rozteče je definována vztahem [27]:

$$p = \frac{\pi \cdot d}{z} = m \cdot \pi, \quad (4.2)$$

kde:  $p$  - rozteč [mm],  
 $d$  - průměr roztečné kružnice [mm],  
 $z$  - počet zubů [-],  
 $m$  - modul [mm].

Povrch roztečného válce dělí zub na hlavovou a patní část. Průměr roztečného válce je označen jako **roztečná kružnice**, která je teoretickou kružnicí a jsou na ni určovány zubové parametry jako rozteč, šířka zubu a zubové mezery. Průměr roztečné kružnice se určuje dle následujícího vztahu [27]:

$$d = \frac{p \cdot z}{\pi} = m \cdot z, \quad (4.3)$$

kde:  $d$  - průměr roztečné kružnice [mm],  
 $p$  - rozteč [mm],  
 $z$  - počet zubů [-],  
 $m$  - modul [mm].

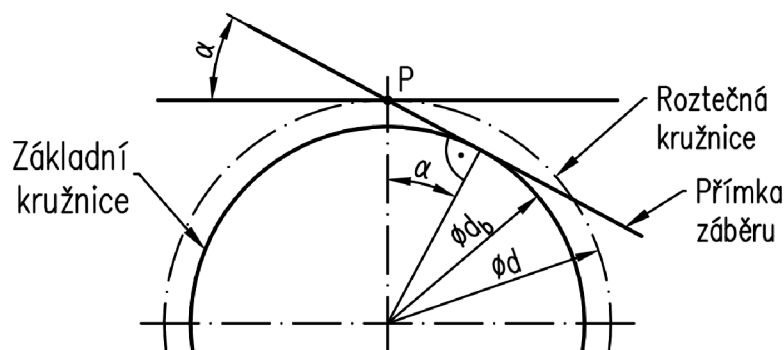
Dalším důležitým parametrem pro ozubená soukolí, jež udává vzdálenost podélných os dvou nekorigovaných ozubených kol, se nazývá **osová vzdálenost**. Užitím kladné vůle mezi středy hřídelů nesoucích ozubená kola je dosaženo optimálního záběru soukolí. Při záporné nebo nulové vůle dochází k nárůstu provozní teploty vzniklé třením mezi koly, a to má za následek větší opotřebení ozubení [47].

Osová vzdálenost je definována vztahem [27]:

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{(z_1 + z_2) \cdot m}{2}, \quad (4.4)$$

kde:  $a$  - osová vzdálenost [mm],  
 $d_1$  - průměr roztečné kružnice pastorku [mm],  
 $d_2$  - průměr roztečné kružnice hnaného kola [mm],  
 $z_1$  - počet zubů pastorku [-],  
 $z_2$  - počet zubů hnaného kola [-],  
 $m$  - modul [mm].

Průměr **základní kružnice** je odvozen od průměru roztečné kružnice a úhlu záběru. Základní kružnice slouží k určení profilu zubu, jelikož odvalováním přímky po základní kružnici vzniká evolventní profil ozubení viz předešlá část o evolventním ozubení. Důležitou součástí základní kružnice tvoří **úhel záběru  $\alpha$** , který je normalizován dle ČSN 01 4607 pro čelní ozubená kola s evolventním ozubením na hodnotu  $20^\circ$ . Tento úhel svírá tečna roztečné kružnice v bodě P a tečna základní kružnice (přímka záběru) v bodě P (obr. 20) [45; 47].



Obr. 20 Úhel záběru [45].

Průměr základní kružnice je definována vztahem [27]:

$$d_b = d \cdot \cos \alpha, \quad (4.5)$$

kde:  $d_b$  - průměr základní kružnice [mm],  
 $d$  - průměr roztečné kružnice [mm],  
 $\alpha$  - úhel záběru [°].



**Hlavová kružnice** se určuje pomocí průměru roztečné kružnice a **výšky hlavy zubu**, která je rovna velikosti modulu ozubeného kola. Hlavová kružnice je definována vztahem [27]:

$$d_a = d + 2 \cdot h_a, \quad (4.6)$$

kde:  $d_a$  - průměr hlavové kružnice [mm],  
 $d$  - průměr roztečné kružnice [mm],  
 $h_a$  - výška hlavy zubu [mm].

**Výška paty zubu** je definována vztahem [27]:

$$h_f = 1,25 \cdot m, \quad (4.7)$$

kde:  $h_f$  - výška paty zubu [mm],  
 $m$  - modul [mm].

Pomocí vypočtené výšky paty zubu se následně určí průměr **patní kružnice** dle vztahu [27]:

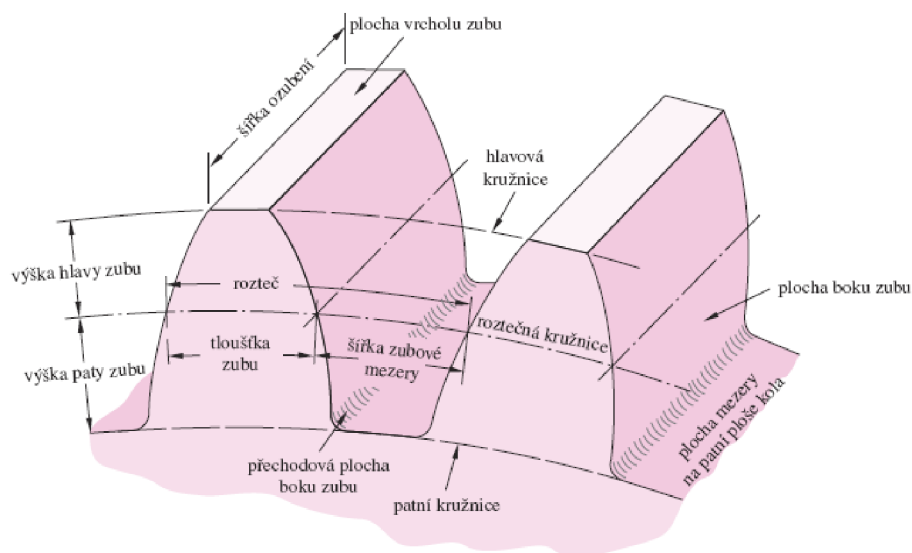
$$d_f = d - 2 \cdot h_f, \quad (4.8)$$

kde:  $d_f$  - průměr patní kružnice [mm],  
 $d$  - průměr roztečné kružnice [mm],  
 $h_f$  - výška paty zubu [mm].

Vzdálenost mezi patní kružnicí jednou ozubeného kola a hlavovou kružnicí se nazývá **hlavová vůle**. Všechny parametry jsou zobrazeny (obr. 21). Hlavová vůle je definována vztahem [27]:

$$c = 0,25 \cdot m, \quad (4.9)$$

kde:  $c$  - hlavová vůle [mm],  
 $m$  - modul [mm].



Obr. 21 Základní parametry ozubeného kola s přímými zuby [45].

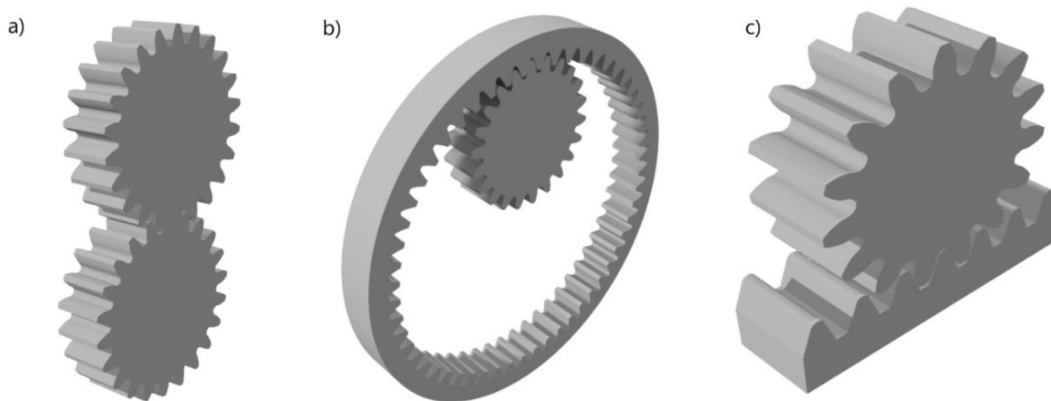
## 4.4 Čelní soukolí

Slouží pro přenos a transformaci výkonu mezi hřídeli s rovnoběžnými osami rotace. Jedná se o nejpoužívanější a nejrozšířenější skupinu ozubených kol. Tato ozubená kola se rozdělují na základě tvaru boční křivky zubu, jenž vznikne jako průsečnice boku zubu a sousého válce ozubeného kola na kola se zuby přímými, šikmými a šipovými. U pastorku se volí minimální

teoretický počet zubů  $z_{\min} = 17$  společně s úhlem záběru  $\alpha = 20^\circ$  z důvodu eliminace podřezání paty zubů. V praxi je ovšem přípustné mírné podřezání, minimální počet zubů se volí  $z_{\min} = 14$  [27; 43].

#### 4.4.1 Čelní ozubená soukolí s přímými zuby

Čelní kola s přímými zuby jsou výrobně nejjednodušším typem ozubených kol. Boční křivka zubu je rovnoběžná s osou kola. U tohoto typu ozubení nedochází k axiálnímu zatížení ovšem dochází k rázům způsobeným tím, že zub vstupuje celý do záběru a dochází tak k okamžitému zatížení zubu. Tento typ soukolí se dále dělí na soukolí s vnitřním ozubením, kde jedno kolo má vnitřní ozubení, což způsobí stejný smysl otáčení hnaného kola a pastorku, a na kola s ozubeným hřebenem, který transformuje rotační pohyb na přímočarý pohyb nebo opačně (obr. 22). Základní parametry ozubeného kola s přímými zuby jsou zmíněny v předešlé části (obr. 21) [45; 48].

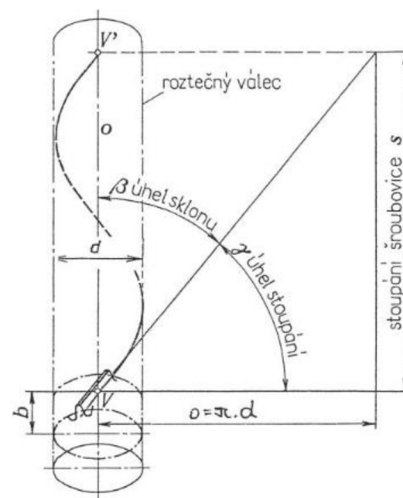


Obr. 22 Čelní ozubené soukolí s a) vnějším ozubením, b) vnitřním ozubením c) ozubeným hřebenem.

#### 4.4.2 Čelní ozubená soukolí se šikmými zuby

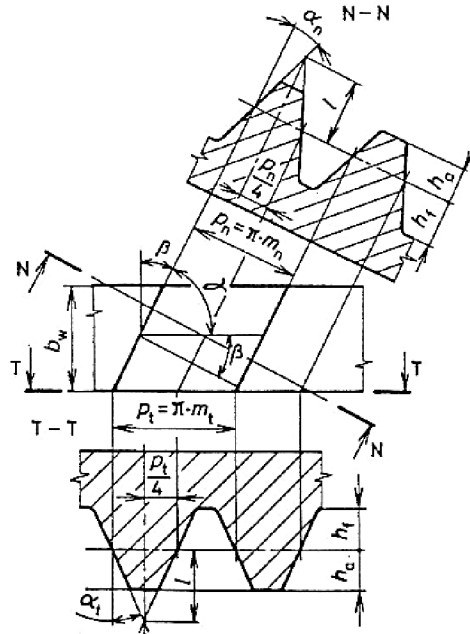
Boční křivka zubu je tvořena šroubovicí s velkým úhlem stoupání, která u ozubených kol s malou šířkou zubu tvoří šikmou přímku (obr. 23). Úhel sklonu zubu  $\beta$  se volí v rozmezí  $6^\circ$  až  $30^\circ$ . Zub má pozvolný a plynulý vstup a výstup do záběru což způsobí klidný a tišší chod na rozdíl od soukolí s přímými zuby [45; 49].

viz



Obr. 23 Šroubovice šikmého ozubení [49].

Nevýhodou tohoto typu ozubení je vznik axiálních sil působících na zub vlivem zešikmení. Eliminaci axiální síly lze docílit pomocí čelního ozubení s dvojnásobně šikmými zuby nebo šípovými zuby, které eliminují axiální síly a příznivý vliv postupného záběru je zachován. U čelního ozubeného soukolí se šikmými zuby rozeznáváme profil zubů vzhledem k rovině zobrazení na normálový (index  $n$ ) a čelní neboli tečný (index  $t$ ) profil (obr. 24) [45; 48; 49].



Obr. 24 Profil zubu šikmého ozubení v normálové a tečné rovině [49].

**Čelní modul** se určí pomocí normálového modulu, který je totožný s modulem nástroje, dle vztahu [49]:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}, \quad (4.10)$$

kde:  $m_t$  - čelní modul [mm],  
 $m_n$  - normálový modul [mm],  
 $\beta$  - úhel sklonu zubu [°].

**Úhel sklonu zubu** se určí, pokud je známa osová vzdálenost, pomocí vztahu [49]:

$$\cos \beta = \frac{m_n}{2 \cdot a} (z_1 + z_2), \quad (4.11)$$

kde:  $\beta$  - úhel sklonu zubu [°],  
 $m_n$  - normálový modul [mm],  
 $z_1$  - počet zubů pastorku [-],  
 $z_2$  - počet zubů hnaného kola [-],  
 $a$  - osová vzdálenost [mm].

Jestliže je znám úhel sklonu zubu, tak se pro výpočet osové vzdálenosti použije vztah 4.11, ve kterém dochází k záměně úhlu sklonu zubu s osovou vzdáleností, která je neznámou.

**Čelní úhel záběru** je definován vztahem [49]:

$$\tan \alpha_t = \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}, \quad (4.12)$$

kde:  $\alpha_t$  - čelní úhel záběru [°],  
 $\alpha_n$  - normálový úhel záběru [°],  
 $\beta$  - úhel sklonu zubu [°].

Průměr **roztečné kružnice** je definován vztahem [45]:

$$d = m_t \cdot z = \frac{m_n}{\cos \beta} \cdot z, \quad (4.13)$$

kde:  $d$  - roztečná kružnice [mm],  
 $m_t$  - čelní modul [mm],  
 $m_n$  - normálový modul [mm],  
 $\beta$  - úhel sklonu zubu [°],  
 $z$  - počet zubů kola [-].

Průměr **základní kružnice** je definován vztahem [45]:

$$d_b = d \cdot \cos \alpha_t = \frac{m_n \cdot z}{\cos \beta} \cdot \cos \alpha_t, \quad (4.14)$$

kde:  $d_b$  - základní kružnice [mm],  
 $d$  - roztečná kružnice [mm],  
 $m_n$  - normálový modul [mm],  
 $\beta$  - úhel sklonu zubu [°],  
 $\alpha_t$  - čelní úhel záběru [°],  
 $z$  - počet zubů kola [-].

**Čelní rozteč** je definován vztahem [45]:

$$p_t = \pi \cdot m_t = \pi \cdot \frac{m_n}{\cos \beta}, \quad (4.15)$$

kde:  $p_t$  - čelní rozteč [mm],  
 $m_t$  - čelní modul [mm],  
 $m_n$  - normálový modul [mm],  
 $\beta$  - úhel sklonu zubu [°].

#### 4.4.3 Čelní ozubená soukolí se šípovými zuby

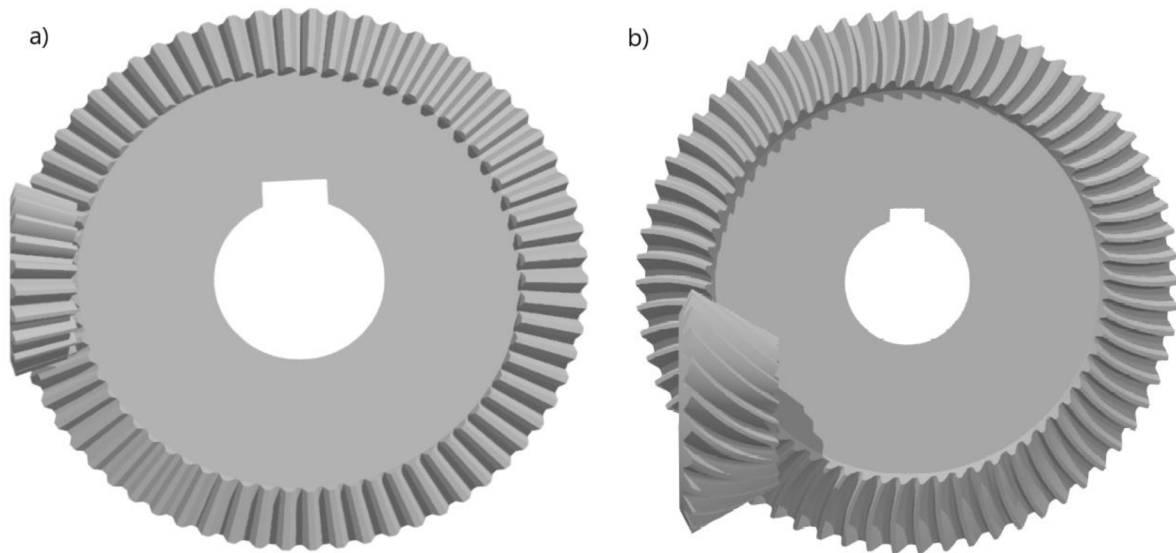
Ozubená soukolí se šípovými zuby (obr. 25) eliminují vznik axiálních sil a dokážou přenášet velké výkony při nízkých obvodových rychlostech. Smysl otáčení se preferuje ve směru šípu z důvodu nejvyšší pevnosti zubu uprostřed šípu. Pro možnost otáčení ve dvou směrech se preferuje užití dvojnásobného šíповého ozubení. Nevýhodou tohoto soukolí je náročná výroba, proto může být kolo vyrobeno složením dvou kol s opačným sklonem zubů nebo použitím drážky v místě špičky zubu, toto řešení má za následek odstranění špičky zubu tedy místa s nejvyšší pevností [49].



Obr. 25 Čelní soukolí se šípovými zuby.

## 4.5 Kuželové soukolí

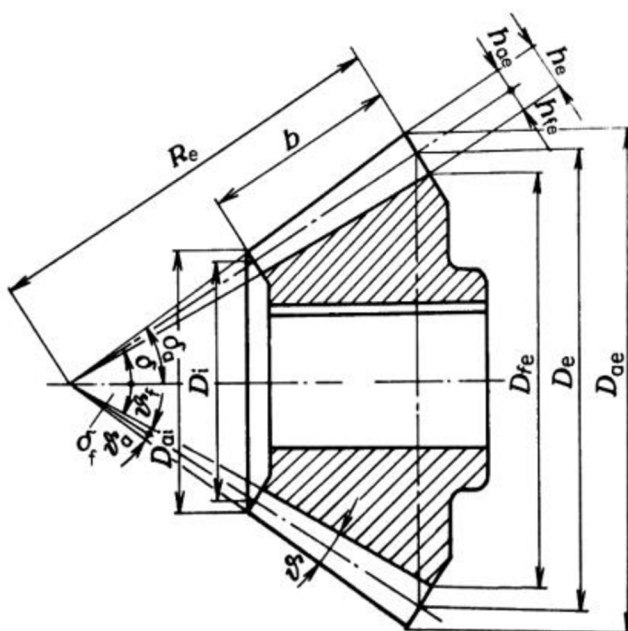
Soukolí tohoto typu umožňuje přenos kroutícího momentu mezi hřídeli s různoběžnými osami svírajícími nejčastěji úhel  $90^\circ$ . Oproti čelnímu soukolí dosahuje kuželové soukolí menší účinnosti a taky je náročnější na výrobu vzhledem k tomu, že zuby kuželového soukolí mají proměnlivou velikost. Kuželové soukolí je taktéž možno využít pro uložení mimoběžných hřídelů (hypoidní ozubení) (obr. 26) [27; 45].



Obr. 26 Kuželové soukolí s a) různoběžnými hřídeli, b) mimoběžnými hřídeli.

### 4.5.1 Vymezení parametrů kuželového ozubeného kola

Kuželová kola mají více parametrů než čelní ozubená kola. Šířka zuby zde není v celé délce povrchové přímky kužele, jelikož špička kuželového ozubení nepřenáší žádný kroutící moment. Řez kuželovým kolem se zakótovanými parametry (obr. 27) [45].

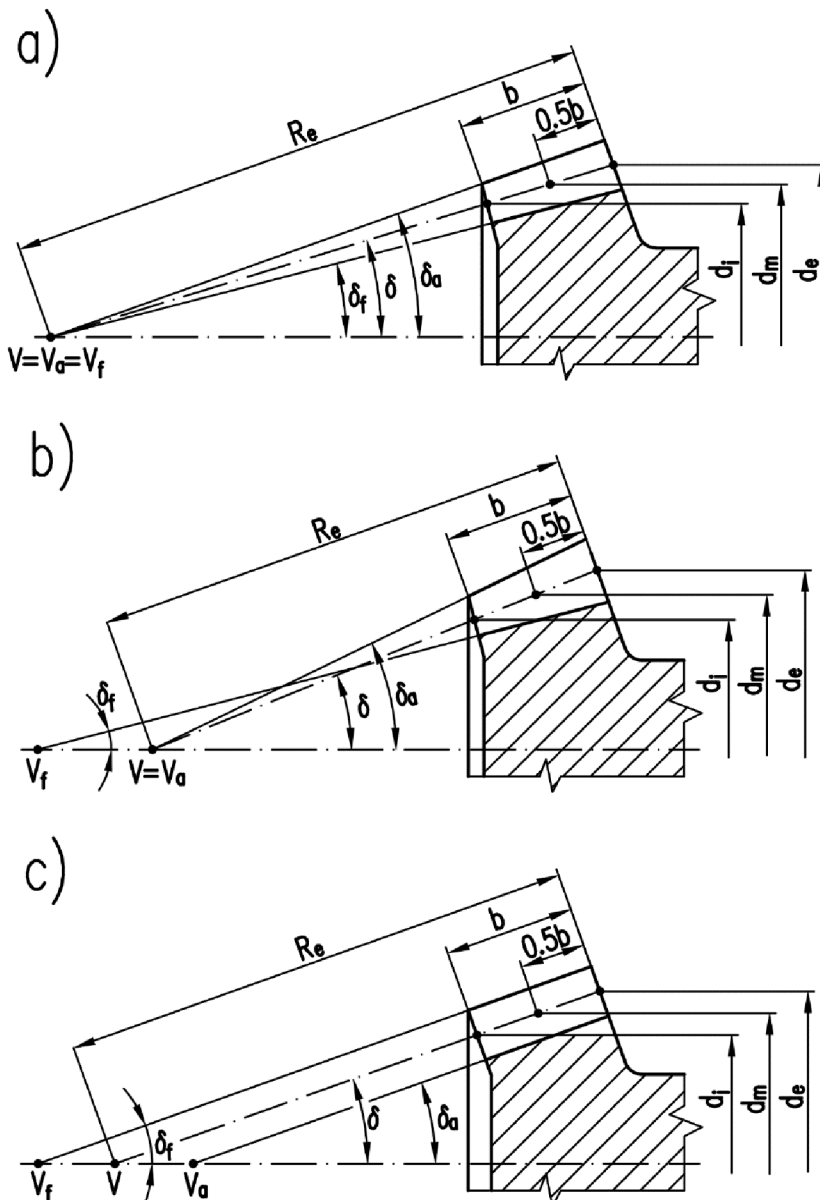


- $D_{ae}$  – vnější hlavový průměr
- $D_{ai}$  – vnitřní hlavový průměr
- $D_i$  – vnitřní střední průměr
- $D_e$  – vnější střední průměr
- $D_{fe}$  – vnější patní průměr
- $R_e$  – vnější délka povrchy roztečného kužele
- $b$  – šířka ozubení
- $h_{ae}$  – vnější výška hlavy zuby
- $h_e$  – vnější výška zuby
- $h_{fe}$  – vnější výška paty zuby
- $\delta$  – úhel roztečného kužele
- $\delta_a$  – hlavový úhel roztečného kužele
- $\delta_f$  – patní úhel roztečného kužele
- $\vartheta$  – úhel zuby
- $\vartheta_a$  – úhel hlavy zuby
- $\vartheta_f$  – úhel paty zuby

Obr. 27 Základní pojmy u kuželových ozubených kol [50].

Geometrie ozubeného kola tvořena patním, roztečným a hlavovým kuželem. Poloha hlavového kužele a patního kužele vůči roztečnému kuželu ovlivňuje výšku zubu. Vzhledem k této poloze se ozubené věnce dělí do třech typů (obr. 28) [27]:

- Typ I – Všechny kuželové plochy mají společný vrchol, což má za následek lineární zvětšování rozměrů zubů od vrcholu kužele.
- Typ II – Patní kuželová plocha má posunutý vrchol za účelem konstantního dna zubové mezery.
- Typ III – Površky všech kuželů jsou rovnoběžné, čímž zub získá konstantní výšku.



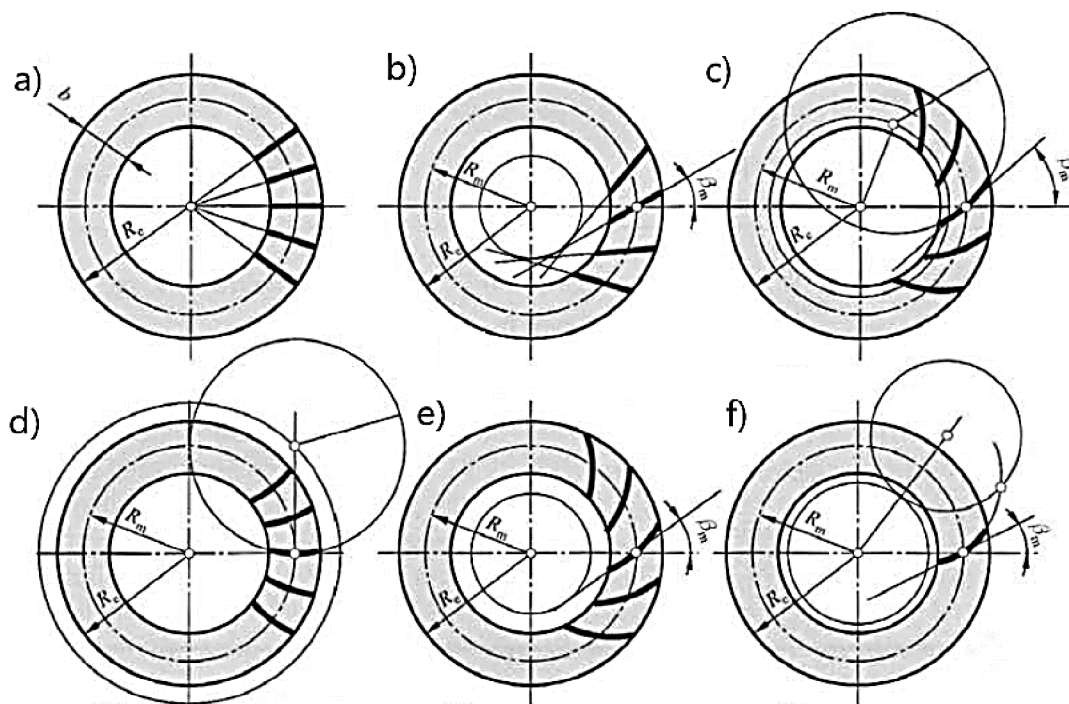
$R_e$  – vnější délka površky roztečného kužele  
 $b$  – šířka zubu  
 $V$  – vrchol roztečného kužele  
 $V_a$  – vrchol patního kužele  
 $V_f$  – vrchol hlavového kužele  
 $d_e$  – vnější roztečný průměr  
 $d_m$  – střední roztečný průměr  
 $d_i$  – vnitřní roztečný průměr  
 $\delta$  – úhel roztečného kužele  
 $\delta_a$  – úhel hlavového kužele  
 $\delta_f$  – úhel patního kužele

Obr. 28 Typy ozubených věnců a) Typ I, b) Typ II, c) Typ III [27].

Ozubené věnce se dělí převážně dle zakřivení zubů. U zubů se rozeznávají tři druhy zakřivení a to přímé, šikmé a zakřivené viz tab. 2. Pro nízké obvodové rychlosti a nenáročné převody se uplatňuje především přímé zakřivení zubů. Pro náročnější převody s vyššími obvodovými rychlostmi se využívá šikmých zubů nebo zakřivených zubů, které mají kruhové, evolventní nebo epicykloidní boční křivku zubů (obr. 29) [27; 45].

Tab. 2 Druhy ozubení kuželových kol [45].

Boční křivka zubu	Druh soukolí, obr.29	Výška zubu, typ věnce	Normalizované veličiny, poznámky
Radiální přímka	s přímými zuby, (a)	proměnlivá, typ I	$m_{et}$ – normalizovaný, $\alpha_t=20^\circ, 15^\circ, 14,5^\circ, 17,5^\circ, \beta_m=0^\circ$ . Méně náročné převody, vyšší hlučnost, nižší obvodové rychlosti $v=2-3m/s$
Šikmá přímka	Se šikmými zuby, (b)	proměnlivá, typ I	$m_{et}$ – normalizovaný, $\alpha_t=20^\circ, 15^\circ, 14,5^\circ, 17,5^\circ, \beta_m=20-40^\circ$ (po $5^\circ$ ). Vyšší obvodové rychlosti, tišší chod, vyšší zatížení a trvanlivost, menší citlivost na nepřesnosti a deformace, dosažení vyšší převodového čísla $u < 10$ .
Kruhový oblouk	Gleason, (c) Gleason-Zerol, (d) Modul-Kurvex	proměnlivá, typ II, proměnlivá, typ II, konstantní, typ III	$m_{mn}$ – normalizovaný, $\alpha_{mn}=20^\circ, 17,5^\circ, 14,5^\circ, \beta_m=30-45^\circ$ . $m_{mn}$ – normalizovaný, $\alpha_{mn}=20^\circ, 17,5^\circ, 14,5^\circ, \beta_m=0^\circ$ . $m_{mn}$ – normalizovaný, $\alpha_{mn}=20^\circ, 17,5^\circ, 14,5^\circ, \beta_m=25-45^\circ$ .
Evolventa (paloida)	Paloidní ozubení, (e) Klingelberg	konstantní, typ III	$m_{mn}$ – normalizovaný, $\alpha_{mn}=20^\circ, 17,5^\circ, \beta_m=30-38^\circ$ .
Epicykloida	eloidní ozubení Oerlikon-spiromatic, (f) cyklopaloidní ozubení Klingelberg	konstantní, tvar III, konstantní, tvar III,	$m_{mn}$ – normalizovaný, $\alpha_{mn}=17,5^\circ, \beta_m=30-50^\circ$ . $m_{mn}$ – normalizovaný, $\alpha_{mn}=20^\circ, 17,5^\circ, \beta_m=0-45^\circ$ .



Obr. 29 Druhy ozubení kuželových kol [45].

#### 4.5.2 Základní parametry kuželového soukolí

**Převodové číslo** kuželového soukolí je definován vztahem [45]:

$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{\sin \delta_2}{\sin \delta_1}, \quad (4.16)$$

- kde:  $u$  - převodové číslo [-],  
 $z_1$  - počet zubů pastorku [-],  
 $z_2$  - počet zubů hnaného kola [-],  
 $\delta_1$  - úhel roztečného kužele pastorku [°],  
 $\delta_2$  - úhel roztečného kužele hnaného kola [°].

**Úhel roztečného kužele** kosoúhlého kuželového soukolí lze určit ze vztahu [45]:

$$\tan \delta_1 = \frac{\sin \Sigma}{u + \cos \Sigma}, \quad (4.17)$$

$$\delta_2 = \Sigma - \delta_1, \quad (4.18)$$

- kde:  $u$  - převodové číslo [-],  
 $\Sigma$  - suma roztečných úhlů [°],  
 $\delta_1$  - úhel roztečného kužele pastorku [°],  
 $\delta_2$  - úhel roztečného kužele hnaného kola [°].

Pro pravouhlé kuželové soukolí platí [45]:

$$\tan \delta_{1,2} = \frac{1}{u}, \quad (4.19)$$

- kde:  $u$  - převodové číslo [-],  
 $\delta_1$  - úhel roztečného kužele pastorku [°],  
 $\delta_2$  - úhel roztečného kužele hnaného kola [°].

**Vnější délka površky roztečného kužele** je definován vztahem [45]:

$$R_e = \frac{0,5 \cdot d_{e1}}{\sin \delta_1} = \frac{0,5 \cdot d_{e2}}{\sin \delta_2}, \quad (4.20)$$

- kde:  $R_e$  - vnější délka površky roztečného kužele [mm],  
 $d_{e1}$  - vnější roztečný průměr pastorku [mm],  
 $d_{e2}$  - vnější roztečný průměr hnaného kola [mm],  
 $\delta_1$  - úhel roztečného kužele pastorku [°],  
 $\delta_2$  - úhel roztečného kužele hnaného kola [°].

**Střední délka površky roztečného kužele** je definován vztahem [45]:

$$R_m = R_e - \frac{b}{2}, \quad (4.21)$$

- kde:  $R_m$  - střední délka površky roztečného kužele [mm],  
 $R_e$  - vnější délka površky roztečného kužele [mm],  
 $b$  - šířka zubu [mm].

**Vnitřní délka površky roztečného kužele** je definován vztahem [45]:

$$R_i = R_e - b, \quad (4.22)$$

- kde:  $R_i$  - vnitřní délka površky roztečného kužele [mm],  
 $R_e$  - vnější délka površky roztečného kužele [mm],  
 $b$  - šířka zubu [mm].



**Šířka ozubení** se stanoví pomocí jednoho z následující dvojice vztahů [45]:

$$b \leq R_e/3, \quad (4.23)$$

$$b \leq 10 \cdot m_{et}, \quad (4.24)$$

kde:  $b$  - šířka zubu [mm]  
 $R_e$  - vnější délka površky roztečného kužele [mm],  
 $m_{et}$  - vnější čelní modul [mm].

**Vnější čelní modul** je definován vztahem [45]:

$$m_{et} = \frac{d_{e1}}{z_1} = \frac{d_{e2}}{z_2}, \quad (4.25)$$

kde:  $m_{et}$  - vnější čelní modul [mm],  
 $d_{e1}$  - vnější roztečný průměr pastorku [mm],  
 $d_{e2}$  - vnější roztečný průměr hnaného kola [mm],  
 $z_1$  - počet zubů pastorku [-],  
 $z_2$  - počet zubů hnaného kola [-].

**Střední čelní modul** je definován vztahem [45]:

$$m_{mt} = \frac{R_m}{R_e} \cdot m_{et}, \quad (4.26)$$

kde:  $m_{mt}$  - střední čelní modul [mm],  
 $m_{et}$  - vnější čelní modul [mm],  
 $R_m$  - střední délka površky roztečného kužele [mm],  
 $R_e$  - vnější délka površky roztečného kužele [mm].

**Střední normálový modul** je definován vztahem [45]:

$$m_{mn} = m_{mt} \cdot \cos \beta_m, \quad (4.27)$$

kde:  $m_{mn}$  - střední normálový modul [mm],  
 $m_{mt}$  - střední čelní modul [mm],  
 $\beta_m$  - střední úhel sklonu boční křivky zubu [°].

**Střední roztečný průměr** je definován vztahem [45]:

$$d_{m1,2} = d_{e1,2} - b \cdot \sin \delta_{1,2} = \frac{m_{mn} \cdot z_{1,2}}{\cos \beta_m} = \frac{d_{e1,2} + d_{i1,2}}{2}, \quad (4.28)$$

kde:  $d_{m1}$  - střední roztečný průměr pastorku [mm],  
 $d_{m2}$  - střední roztečný průměr hnaného kola [mm],  
 $d_{e1}$  - vnější roztečný průměr pastorku [mm],  
 $d_{e2}$  - vnější roztečný průměr hnaného kola [mm],  
 $b$  - šířka zubu [mm],  
 $\delta_1$  - úhel roztečného kužele pastorku [°],  
 $\delta_2$  - úhel roztečného kužele hnaného kola [°],  
 $m_{mn}$  - střední normálový modul [mm],  
 $\beta_m$  - střední úhel sklonu boční křivky zubu [°],  
 $z_1$  - počet zubů pastorku [-],  
 $z_2$  - počet zubů hnaného kola [-],  
 $d_{i1}$  - vnitřní roztečný průměr pastorku [mm],  
 $d_{i2}$  - vnitřní roztečný průměr hnaného kola [mm].

**Čelní úhel záběru** lze stanovit dle následujícího vztahu dosazením hodnot z tab. 2 [45]:

$$\tan \alpha_t = \frac{\tan \alpha_{mn}}{\cos \beta_m}, \quad (4.29)$$

kde:  $\alpha_t$  - čelní úhel záběru [°],  
 $\alpha_{mn}$  - normálový úhel záběru [°],  
 $\beta_m$  - střední úhel sklonu boční křivky zubu [°].

**Úhel hlavy zubu** je definován vztahem [45]:

$$\theta_{a1,2} = \delta_{a1,2} - \delta_{1,2}, \quad (4.30)$$

kde:  $\theta_{a1}$  - úhel hlavy zubu pastorku [°],  
 $\theta_{a2}$  - úhel hlavy zubu hnaného kola [°],  
 $\delta_{a1}$  - úhel hlavového kužele pastorku [°],  
 $\delta_{a2}$  - úhel hlavového kužele hnaného kola [°],  
 $\delta_1$  - úhel roztečného kužele pastorku [°],  
 $\delta_2$  - úhel roztečného kužele hnaného kola [°].

**Úhel paty zubu** je definován vztahem [45]:

$$\theta_{f1,2} = \delta_{1,2} - \delta_{f1,2}, \quad (4.31)$$

kde:  $\theta_{f1}$  - úhel paty zubu pastorku [°],  
 $\theta_{f2}$  - úhel paty zubu hnaného kola [°],  
 $\delta_{f1}$  - úhel patního kužele pastorku [°],  
 $\delta_{f2}$  - úhel patního kužele hnaného kola [°],  
 $\delta_1$  - úhel roztečného kužele pastorku [°],  
 $\delta_2$  - úhel roztečného kužele hnaného kola [°].

Při konstantní výšce zubu je úhel paty zubu i úhel hlavy zubu nulový.

## 5 KONSTRUKCE VYTIPOVANÝCH SOUKOLÍ

Základním parametrem pro konstrukci je regulace 100 otáček/min na 30 otáček/min pomocí kombinace kuželového soukolí a čelního soukolí. Tato kombinace slouží ke změně polohy os vstupního hřídele a výstupního hřídele se zachováním směru otáčení. Výroba ozubených kol reduktoru včetně všech jeho součástí bude provedena 3D tiskem technologií FDM kromě spojovacích materiálů.

### 5.1 Výpočet převodových poměrů a počtu zubů ozubených kol

Ze zadaných vstupních a výstupních otáček je určen celkový převodový poměr definován vztahem [45]:

$$i_c = \frac{n_1}{n_4} = \frac{100}{30} = 3,333 \quad (5.1)$$

kde:  $i_c$  - celkový převodový poměr [-],  
 $n_1$  - vstupní otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ],  
 $n_4$  - výstupní otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ].

Otáčky hnaného kuželového kola a hnacího čelního kola byly zvoleny  $n_2 = n_3 = 52 \text{ min}^{-1}$ , aby bylo dosaženo podobnosti převodových poměrů kuželového soukolí a čelního soukolí.

Převodový poměr kuželového soukolí je určen dle vztahu [45]:

$$i_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{100}{52} = 1,923 \quad (5.2)$$

kde:  $i_{12}$  - převodový poměr kuželového soukolí [-],  
 $n_1$  - vstupní otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ],  
 $n_2$  - otáčky hnaného kuželového kola [ $\text{min}^{-1}$ ].

Převodový poměr čelního soukolí je určen dle vztahu [45]:

$$i_{34} = \frac{i_c}{i_{12}} = \frac{3,333}{1,923} = 1,733 \quad (5.3)$$

kde:  $i_{34}$  - převodový poměr čelního soukolí [-],  
 $i_{12}$  - převodový poměr kuželového soukolí [-],  
 $i_c$  - celkový převodový poměr [-].

Počet zubů hnacího kuželového kola byl zvolen  $z_1 = 26$  a počet zubů hnacího čelního kola byl zvolen  $z_3 = 29$  z důvodu, aby nedocházelo k podřezání paty zubů hnacích kol.

Počet zubů hnaného kuželového kola je definován vztahem [45]:

$$z_2 = i_{12} \cdot z_1 = 1,923 \cdot 26 = 49,998 \doteq 50 \quad (5.4)$$

kde:  $z_2$  - počet zubů hnaného kuželového kola [-],  
 $i_{12}$  - převodový poměr kuželového soukolí [-],  
 $z_1$  - počet zubů hnacího kuželového kola [-].

Počet zubů hnaného čelního kola je definován vztahem [45]:

$$z_4 = i_{34} \cdot z_3 = 1,732 \cdot 29 = 50,228 \doteq 50 \quad (5.5)$$

kde:  $z_4$  - počet zubů hnaného čelního kola [-],  
 $i_{34}$  - převodový poměr čelního soukolí [-],  
 $z_3$  - počet zubů hnacího čelního kola [-].

Získaný převodový poměr kuželového soukolí a čelního soukolí se liší rozdílem 0,19. Počet zubů hnacích kol byl volen tak, aby nedošlo k podřezání paty zubů, ale také byl volen s ohledem na výsledný počet zubů hnaných kol s úmyslem podobnosti počtu zubů těchto kol. Na základě toho, že počty zubů hnaných kol se shodují budou mít téměř stejné rozměry hlavové kružnice.

## 5.2 Výpočet kuželového soukolí

Pro kuželové soukolí byl zvolen modul  $m_{12} = 2 \text{ mm}$  dle ČSN 01 4608 z přednostní řady 1. Šířka kuželových kol byla zvolena  $b_1 = b_2 = 15 \text{ mm}$  podle vztahu (4.24). Čelní úhel záběru byl zvolen  $\alpha_t = 20^\circ$  (tab. 2). Výpočet rozměrů kuželového soukolí byl proveden pomocí výpočetního programu MITCalc (tab. 3), který je doplňkem tabulkového procesoru Microsoft Excel viz příloha P7 [51].

Tab. 3 Parametry kuželového soukolí.

Parametry	Hnací kolo	Hnané kolo
Úhel roztečného kužele	$\delta_1 = 27,474^\circ$	$\delta_2 = 62,526^\circ$
Vnější roztečný průměr	$d_{e1} = 58,918 \text{ mm}$	$d_{e2} = 113,304 \text{ mm}$
Střední roztečný průměr	$d_{m1} = 51,998 \text{ mm}$	$d_{m2} = 51,998 \text{ mm}$
Vnitřní roztečný průměr	$d_{i1} = 45,078 \text{ mm}$	$d_{i2} = 86,688 \text{ mm}$
Vnější délka povrchy roztečného kužele	$R_e = 63,854 \text{ mm}$	
Skutečný převodový poměr	$i_{12sk} = 1,923$	
Vnější hlavový průměr	$d_{ae1} = 64,338 \text{ mm}$	$d_{ae2} = 114,790 \text{ mm}$
Vnější patní průměr	$d_{fe1} = 55,173 \text{ mm}$	$d_{fe2} = 110,024 \text{ mm}$
Vnitřní hlavový průměr	$d_{ai1} = 49,016 \text{ mm}$	$d_{ai2} = 87,716 \text{ mm}$
Vnitřní patní průměr	$d_{fi1} = 42,212 \text{ mm}$	$d_{fi2} = 84,178 \text{ mm}$
Jednotkové posunutí	$x_1 = 0,319 \text{ mm}$	$x_1 = -0,319 \text{ mm}$

### 5.3 Výpočet čelního soukolí

Stejně tak jako u kuželového soukolí byl u čelního soukolí zvolen modul  $m_{34} = 2 \text{ mm}$  dle normy ČSN 01 4608 z přednostní řady 1. Pro soukolí byla zvolena varianta čelního ozubení s přímými zuby. Šířka hnacího kola byla zvolena  $b_3 = 16 \text{ mm}$  a šířka hnaného kola  $b_4 = 14 \text{ mm}$  byla zvolena menší o velikost jednoho modulu, aby byla celá šířka zubu hnaného kola v záběru. Pro rychlejší a přesnější výpočet byl použit generátor komponent (tab. 4), který je součástí programu Autodesk Inventor Professional 2022 viz příloha P8 [51].

Tab. 4 Parametry čelního soukolí.

Parametry	Hnací kolo	Hnané kolo
Průměr roztečné kružnice	$d_3 = 58 \text{ mm}$	$d_4 = 100 \text{ mm}$
Průměr hlavové kružnice	$d_{a3} = 62 \text{ mm}$	$d_{a4} = 104 \text{ mm}$
Průměr patní kružnice	$d_{f3} = 53 \text{ mm}$	$d_{f4} = 95 \text{ mm}$
Průměr základní kružnice	$d_{b3} = 54,502 \text{ mm}$	$d_{b4} = 93,969 \text{ mm}$
Osová vzdálenost	$a = 79 \text{ mm}$	
Úhel profilu	$\alpha = 20^\circ$	
Výška hlavy zubu	$h_{a3} = h_{a4} = 2 \text{ mm}$	
Výška paty zubu	$h_{f3} = h_{f4} = 2,5 \text{ mm}$	
Tloušťka zubu	$s_1 = s_2 = 3,142 \text{ mm}$	
Rozteč zubů	$p_1 = p_2 = 6,283 \text{ mm}$	
Skutečný převodový poměr	$i_{34sk} = 1,724$	
Součinitel trvání záběru	$\varepsilon = 1,700$	

Skutečný celkový převodový poměr je definován vztahem [45]:

$$i_{csk} = i_{12sk} \cdot i_{34sk} = 1,923 \cdot 1,724 = 3,315 \quad (5.6)$$

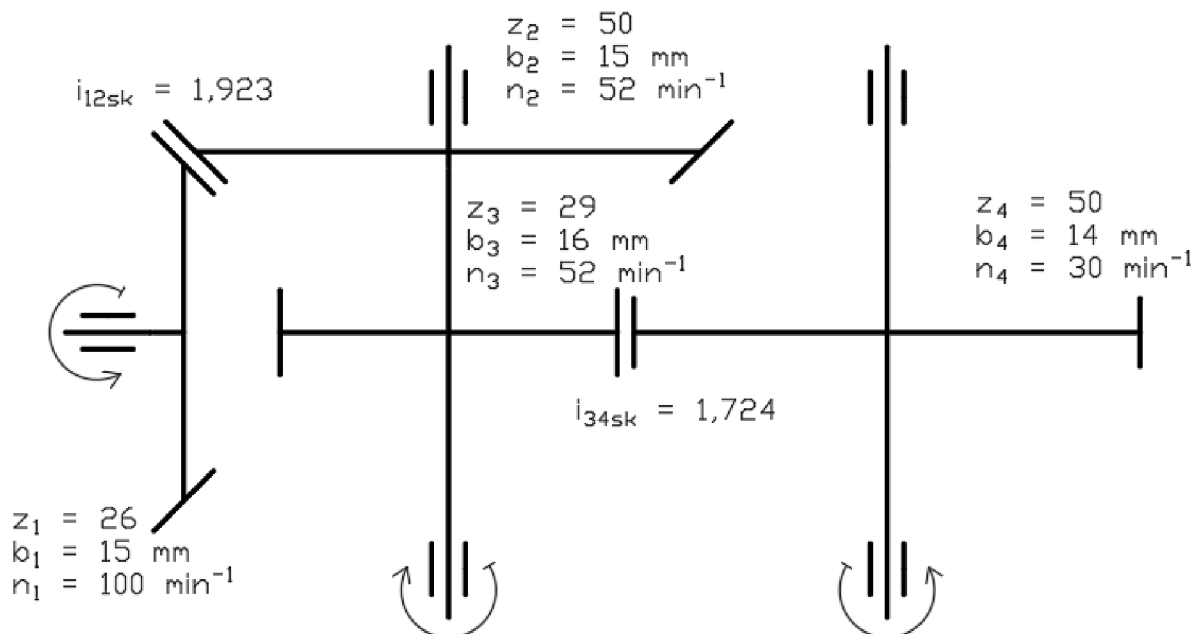
kde:  $i_{csk}$  - skutečný převodový poměr [-],  
 $i_{12sk}$  - skutečný převodový poměr kuželového soukolí [-],  
 $i_{34sk}$  - skutečný převodový poměr čelního soukolí [-].

Rozdíl mezi skutečným převodovým poměrem a teoretickým se určí podle vztahu:

$$1 - \frac{i_{csk}}{i_c} = 1 - \frac{3,315}{3,333} = 5,4 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 0,54\% \quad (5.7)$$

kde:  $i_{csk}$  - skutečný převodový poměr [-],  
 $i_c$  - teoretický převodový poměr [-].

Zuby ozubených kol byl voleny tak, aby nedocházelo k záběru stejných párů zubů a vzniku vůlí. V případě kuželového soukolí skutečný počet zubů hnaného kola odpovídá teoretickému počtu zubů viz vztah (5.4), a to má za následek, že nedošlo ke změně teoretického převodového poměru a skutečného převodového poměru kuželového soukolí. Skutečný počet zubů čelního hnaného kola byl zaokrouhlen na nejbližší hodnotu viz vztah (5.5). Vlivem tohoto zaokrouhlení došlo k změně mezi skutečným převodovým poměrem a teoretický převodovým poměrem o 0,009. Tato změna měla za následek změnu celkového převodového poměru o 0,54 %. Směr otáčení a kinematické schéma je zobrazeno (obr. 30).



Obr. 30 Kinematické schéma.

## 6 PŘÍPRAVA VÝROBNÍHO PROCESU

Technologie 3D tisku dělí výrobní proces do tří fází skládajících se z preprocessing, processing a postprocessing. Tato kapitola se zabývá preprocessingem, který je složen z tvorby modelu, exportování modelu do formátu STL a nastavení tisku. Model lze vytvořit pomocí programu, který umožňuje tvorbu 3D modelu, tento způsob je použit v kapitole 6.1 a kapitole 6.2 [3].

Dalšími způsoby, jak jsou vytvářeny počítačové modely pro 3D tisk, je použitím 3D skeneru nebo fotogrametrií. Tyto způsoby fungují na přenesení již vytvořeného reálného modelu nebo objektu do digitální formy. Fotogrametrie je pro běžného uživatele 3D tisku dostupnější, jelikož je založena na principu tvorby modelu z fotografií objektu pořízených z různých úhlů použitím např. mobilního zařízení a přenesením do fotogrammetrického softwaru např. Meshroom (obr. 31), který z fotografií vytvoří digitální objekt. Kvalita digitálního objektu se odvíjí od použitého rozlišení fotoaparátu a počtu fotografií (doporučený počet fotografií je 30-80) [3].



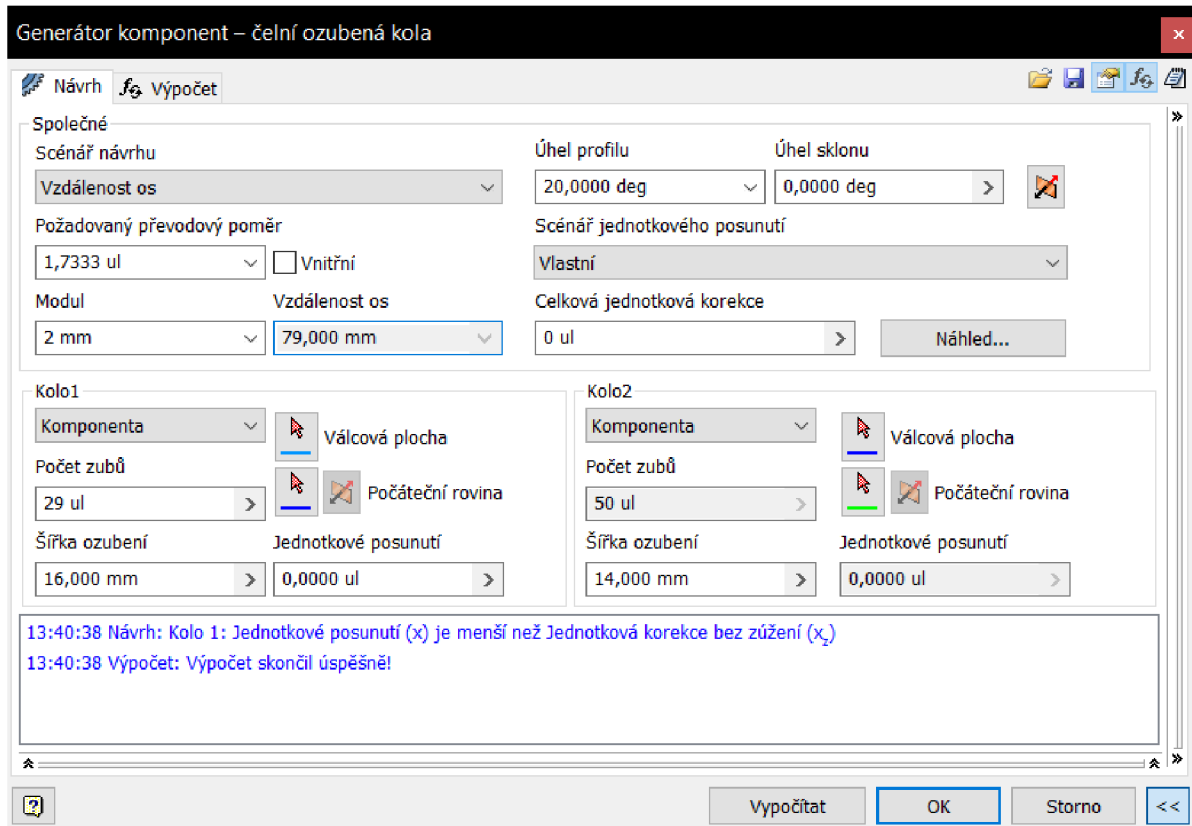
Obr. 31 Tvorba digitálního objektu fotogrametrií [3].

Nejjednodušší způsob získání modelu je stažení modelu z webového portálu s 3D modely např. Thingiverse. Stahování modelů využívají převážně uživatelé 3D tisku, kteří nemají zkušenosti s tvorbou trojrozměrných modelů. Většina webových portálů umožňuje stažení modelů zdarma nebo za finanční poplatek. Na těchto webech se vyskytuje široká škála modelů od hraček až po mechanické nástroje [3].

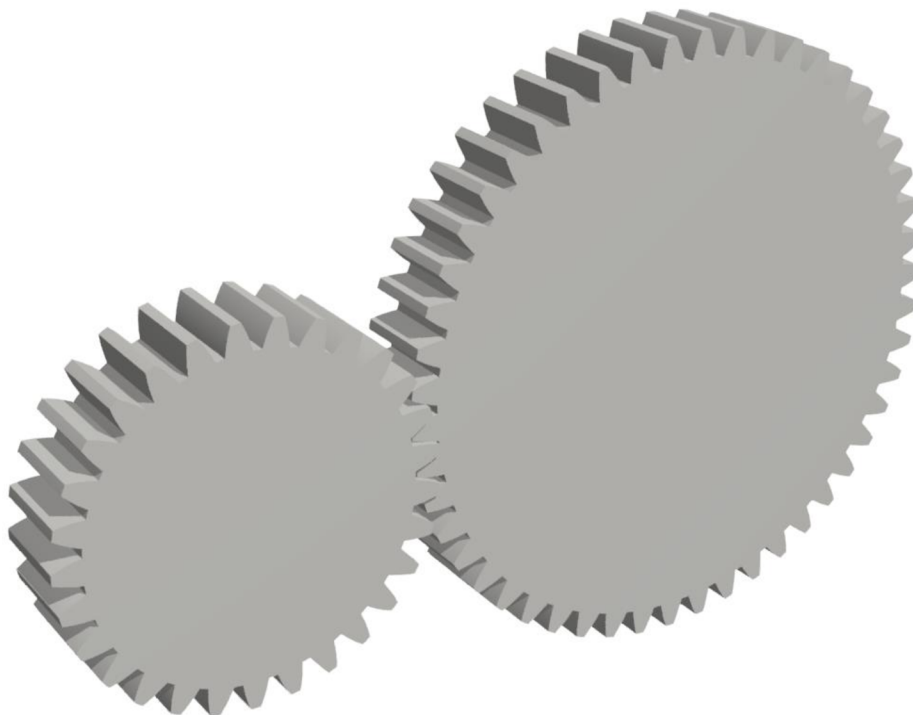
### 6.1 Tvorba čelního soukolí

Model čelního soukolí lze zkonstruovat dvěma způsoby v programu Autodesk Inventor. Prvním způsobem je zkonstruovat čelní soukolí pomocí 2D náčrtu, který je následně vysunut o hodnotu šířky zubu. Tento způsob je zdlouhavý, neboť mu předchází výpočet všech parametrů ozubení a tvorba evolventy. Druhý způsob umožňuje tvorbu celkového čelního soukolí generátorem komponent, který byl použit pro tvorbu čelního soukolí v této práci. V generátoru komponent stačí zadat vstupní parametry pro soukolí (obr. 32) a následně vygenerovat soukolí (obr. 33).

Generátor po zadání vstupních parametrů vypočítá všechny parametry ozubených kol včetně evolventy. Generátor umožňuje, při zadání zatížení a materiálu, výpočet pevnosti viz příloha P9. V této práci bude zkonstruován pouze prototyp reduktoru, výpočet pevnosti nebude proveden.



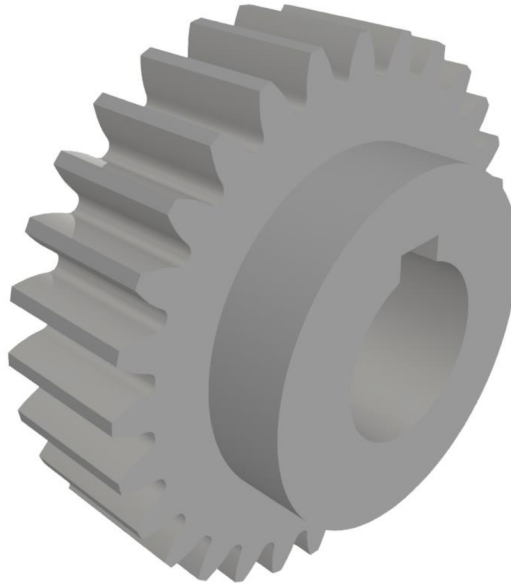
Obr. 32 Generátor komponent pro čelní ozubená kola.



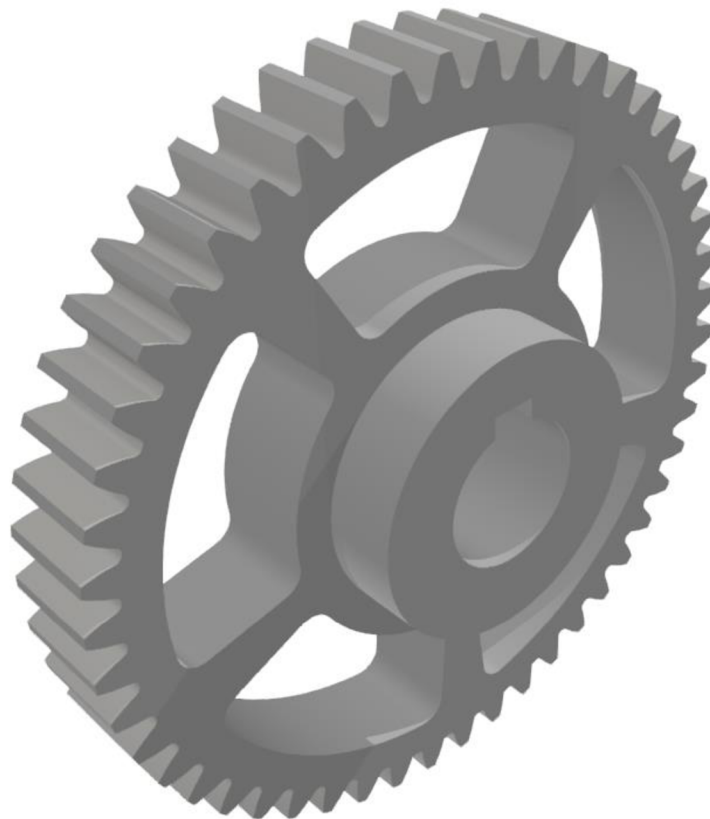
Obr. 33 Vygenerované čelní soukolí.



Vygenerovaná ozubená kola je pak potřeba následně upravit, jelikož postrádají otvor pro hřídel společně s drážkou pro pero. Do obou kol byl vytvořen otvor o průměru  $d = 20$  mm s drážkou pro pero dle ČSN 02 2562. Na hnacím kole bylo vytvořeno osazení o délce  $L_1 = 9$  mm a průměru  $d_{o1} = 40$  mm (obr. 34). Hnané kolo bylo, tak jako hnací kolo, vybaveno osazením o délce  $L_2 = 10$  mm a průměru  $d_{o2} = 40$  mm. Osazení hnaného kola je kvůli minimální délce použitého pera dle ČSN 02 2562 (obr. 35) [52].



Obr. 34 Čelní ozubené kolo hnací.

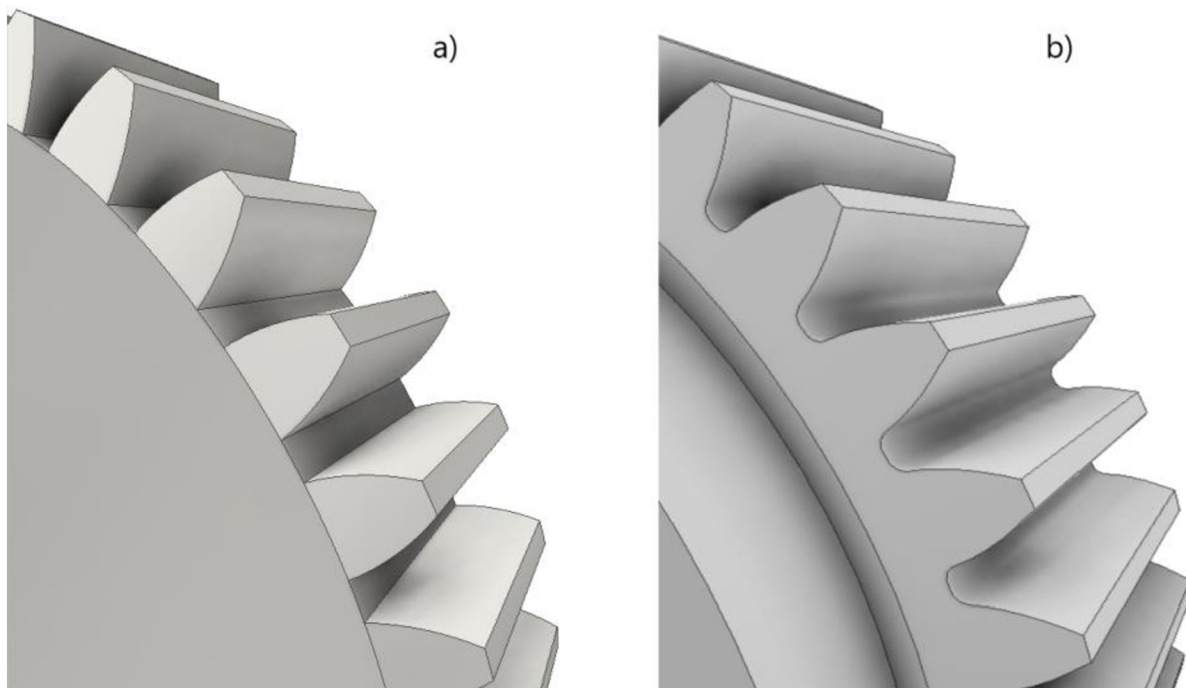


Obr. 35 Čelní ozubené kolo hnané.

Parametry odlehčení hnaného kola, viz příloha P10, jsou 5x zobrazeny pomocí kruhového pole vzhledem k ose ozubeného kola. Toto odlehčení je vytvořeno za účelem úspory materiálu, která zde tvoří 14,8 % vzhledem k neodlehčenému kolu, a za účelem zamezení zkroucení prototypu, které by vzniklo teplotními rozdíly mezi jednotlivých vrstev prototypu. Časový rozdíl tisku odlehčeného a neodlehčeného hnaného kola je dle programu Ultimaker Cura 15 min. U tak rozsáhlého odlehčení by se dalo očekávat markantnější zkrácení délky tisku, jenomže tiskárna tiskne stěny poloviční rychlostí, než jakou tiskne výplň prototypu a odlehčené kolo obsahuje 5x více stěn, a proto je délka tisku obou verzí téměř podobná.

## 6.2 Tvorba kuželového soukolí

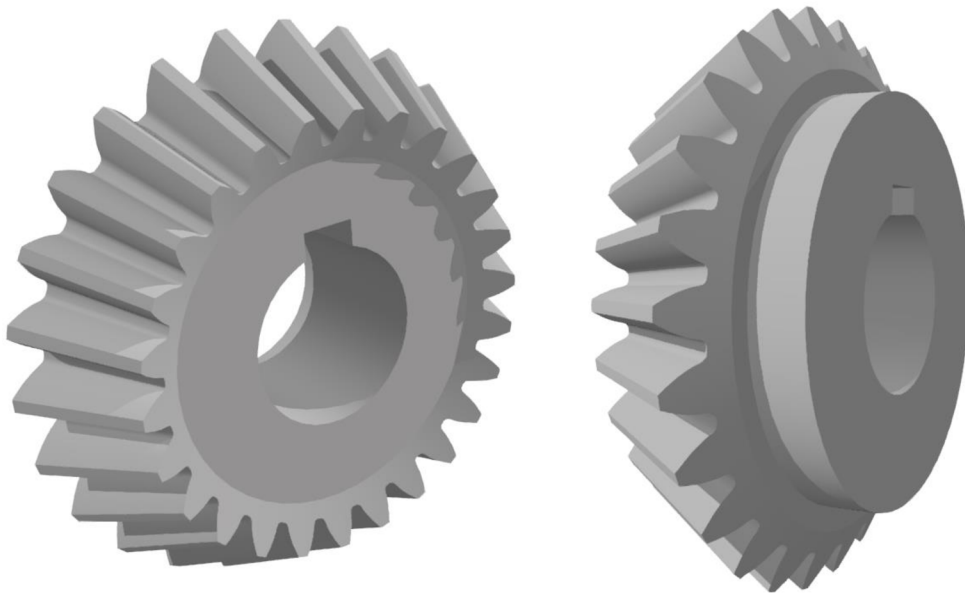
Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.2, ke konstrukci kuželového soukolí byl použit program MITCalc, který společně s výpočty poskytuje i grafické výstupy pro CAD systémy. Autodesk Inventor nabízí taktěž generování kuželových soukolí, jenomže u kuželových soukolí nedokáže správně vykreslit profil zubu a nenabízí komplexnější generování soukolí, tak jako MITCalc. Proto bylo soukolí vygenerováno v programu MITCalc a následně zkonstruováno v Autodesk Inventor (obr. 36a, obr. 36b). MITCalc nabízí tabulky s vygenerovanými profily zubu, které se následně tažením přes 3D náčrty zhotoví viz příloha P11.



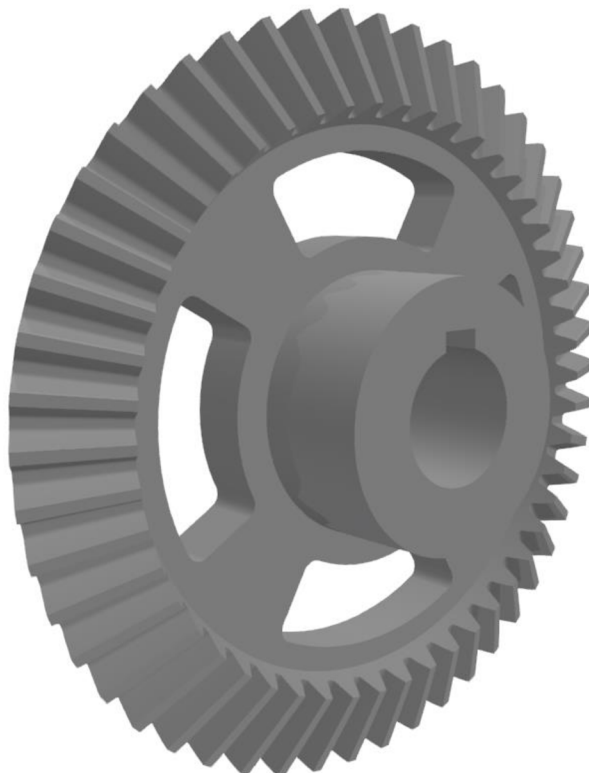
Obr. 36 Profil zubu vygenerován programem a) Autodesk Inventor, b) MITCalc.

Pro hnací a hnané kuželové soukolí byl zvolen otvor pro hřídel a drážka pro pero stejných rozměrů, jako pro čelní soukolí. Hnací kolo (obr. 37) obsahuje i osazení kvůli splnění požadavku na minimální délku pera. Toto osazení o průměru  $d_{03} = 45$  mm je vysunuto do délky  $L_3 = 6$  mm. Pro hnané kolo (obr. 38) bylo vytvořeno odlehčení společně s osazením o průměru  $d_{04} = 40$  mm vysunuto do délky  $L_4 = 18,4$  mm.

Délka osazení hnaného kola je zvolena tak, aby hnané kuželové kolo a hnací čelní kolo využívalo jedno pero na hřídeli a aby vymezovalo vzdálenost mezi těmito koly. Odlehčení bylo vytvořeno za účelem úspory materiálu, která zde tvoří 5,5 % a za účelem zamezení zkroucení vnější hrany hnaného kola.



Obr. 37 Kuželové ozubené kolo hnací.

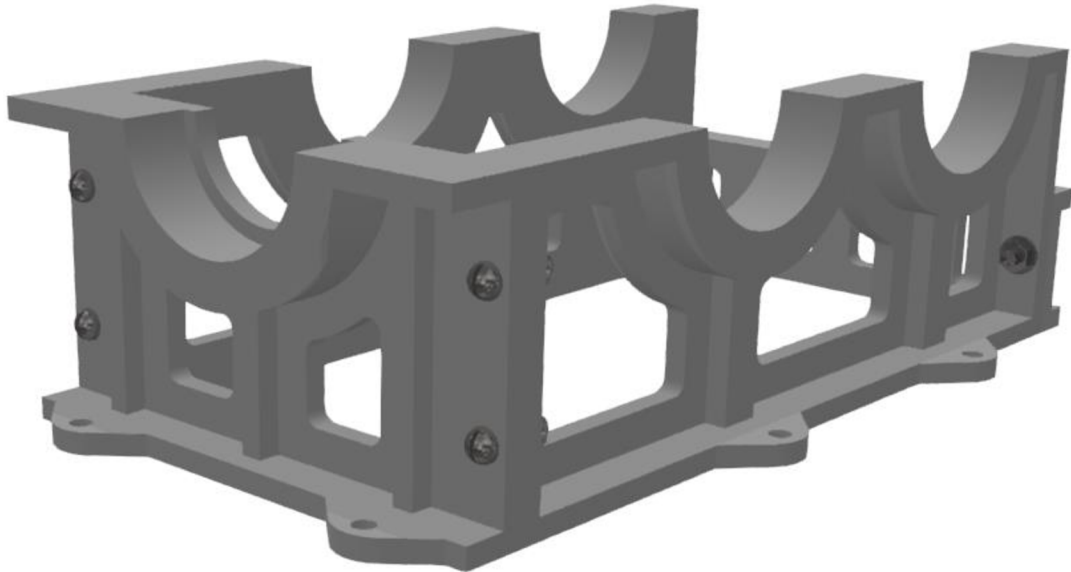


Obr. 38 Kuželové ozubené kolo hnané.

### 6.3 Konstrukce zbylých prvků sestavy

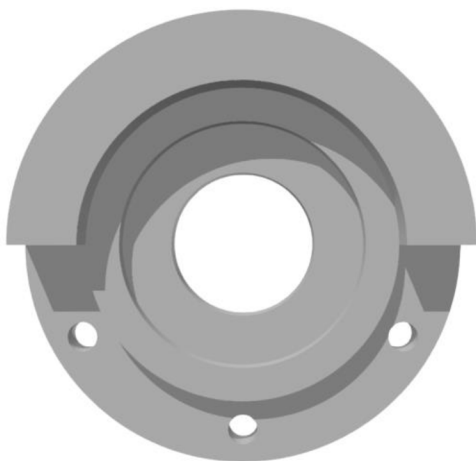
Celá sestava byla navržena tak, aby mohla být vytvořena 3D tiskem kromě spojovacích materiálů, jak již bylo zmíněno v kapitole 5. Sestava je navržena s požadavkem na jednoduché zkompletování a je složena z převodové skříně, hřídelů, součástí hřídelů a ozubených kol. Pro demonstraci a lepší pochopení směru otáčení a převodového poměru je vstupní hřídel opatřena kličkou, aby bylo umožněno otáčet hřídelem. Výstupní hřídel je opatřena součástí ve tvaru šipky, sloužící k demonstrování převodového poměru, která se při jednom otočení kličkou otočí o třetinu jedné otočky.

Převodová skříň se skládá z předního krytu, zadního krytu a bočních krytů, které jsou spojeny šroubovými spoji (obr. 38). Všechny kryty jsou odlehčeny, aby nedošlo k deformaci během tisku způsobené teplotními rozdíly vzniknutými nerovnoměrným vyhříváním podložky. Tato odlehčení mají také za následek úsporu tisknutého materiálu.

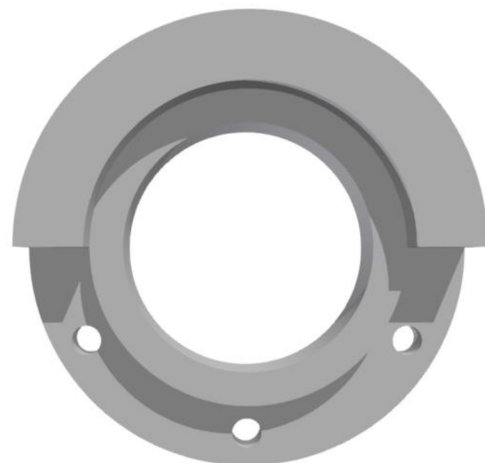


Obr. 39 Zkompletované kryty spojené šroubovými spoji.

Součástí převodové skříně jsou i kryty konců hřídelů nasazené na boční kryty a přední kryt, ke kterým jsou připevněny pomocí samořezných šroubů. Tyto kryty zabraňují posuvnému pohybu ložisek a hřídelů. Tyto kryty jsou vytvořeny ve dvou variantách, první varianta (obr. 40) je určena pro vstupní hřídel a konec výstupní hřídele, který obsahuje čtvercovým průřezem. Druhá varianta krytu (obr. 41) je určena pro zbylé konce hřídelů, je navržena tak, aby umožňovala náhled na konce hřídelů a ložiska kvůli lepší vizualizaci.

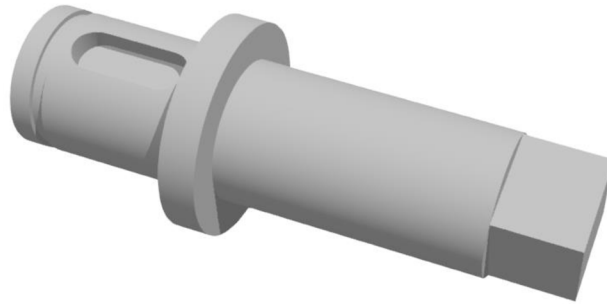


Obr. 40 První varianta krytu konce hřídele.

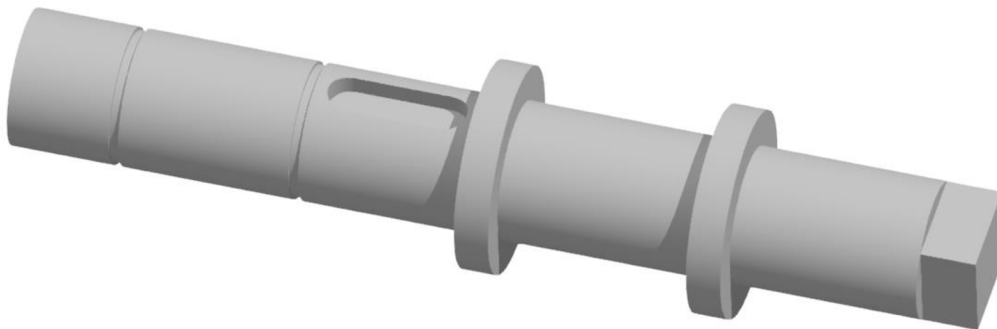


Obr. 41 Druhá varianta krytu konce hřídele.

Hřídele nesoucí ozubená kola byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor generátorem komponent hřídele, který umožňuje vytvořit jakoukoliv hřídel společně s prvky hřídele. Na vstupní (obr. 42) a výstupní hřídeli (obr. 43) byl vytvořen konec s čtvercovým průřezem na který jsou nasazeny klika a šipka. Hřídel nesoucí hnané kuželové kolo a hnací čelní kolo (obr. 44) obsahuje perodrážku určenou pro pero, které přenáší otáčky mezi hnaným kuželovým kolem a hnacím čelním kolem.



Obr. 42 Vstupní hřídel.



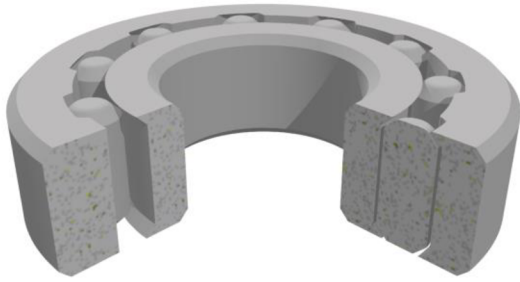
Obr. 43 Výstupní hřídel.



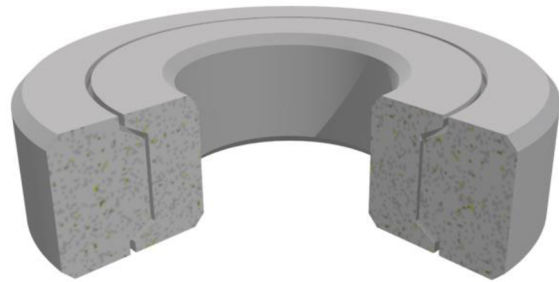
Obr. 44 Prostřední hřídel.

Průměr nesoucí ozubená kola všech hřídelů byl navržen na velikost 20 mm. Později však byl tento průměr upraven na velikost 19,8 mm, neboť po vytisknutí vstupní hřídele byla provedena zkouška nasazení hnacího kuželového kola, která skončila neúspěchem. Původní průměr hřídelů by bylo možné upravit v postprocessingu ovšem tento proces by byl zdlouhavý a došlo by k narušení pevnosti hřídelů. Ozubená kola jsou zajištěna pojistnými kroužky dle ČSN 02 2930, které byly taktéž vytisknuty.

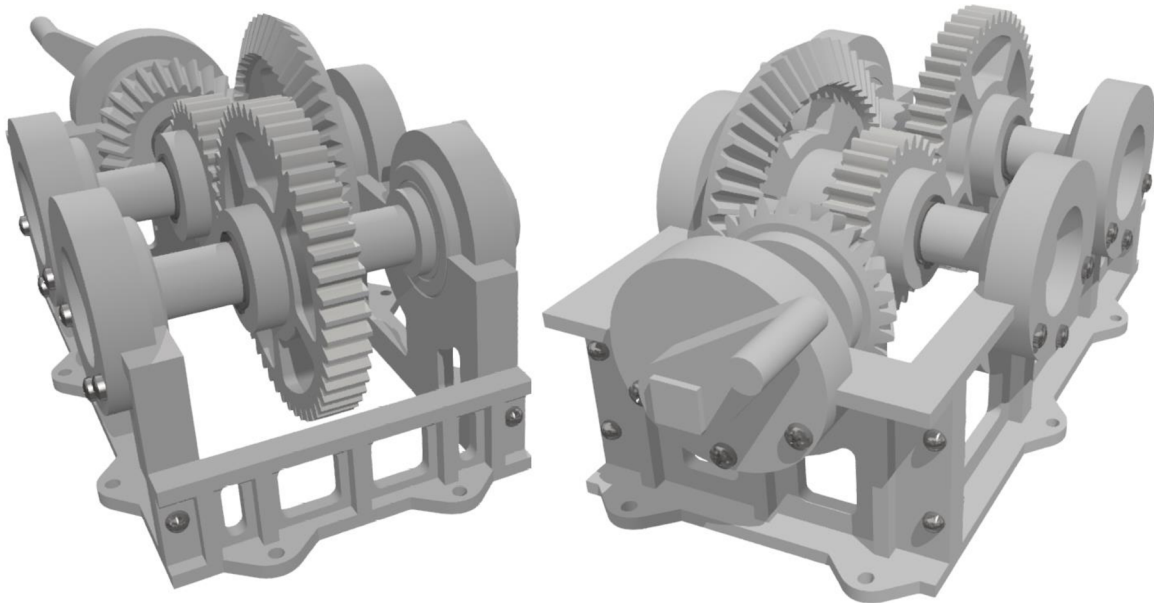
Ložiska pro uložení hřídelů byly nejprve navrženy jako válečková ložiska (obr. 45) upravené pro 3D tisk. Tato konstrukce ložisek byla posléze zavrhnuta, jelikož docházelo k spékání materiálu mezi válečky, vnějšího kroužku a vnitřního kroužku ložiska, a také k trhavému rotačnímu pohybu. Proto byly navrženy ložiska fungující na podobném principu jako kluzná ložiska (obr. 46). U těchto ložisek dochází k mírnému viklání do stran, které je eliminováno, pokud je hřídel uložena ve dvou ložiscích. Vstupní hřídel je uložena na jednom ložisku a zde se toto viklání projevuje, ale pro účely konstrukce jsou tato ložiska postačující. Celou sestavu (obr. 47) lze zkompletovat pomocí křížového šroubováku, plochého šroubováku a klíče pro vnější šestihrany.



Obr. 45 Válečkové ložisko zobrazené v řezu.



Obr. 46 Kluzné ložisko zobrazené v řezu.



Obr. 47 Zkompletovaná sestava.

#### 6.4 Volba materiálu a nastavení parametrů tisku

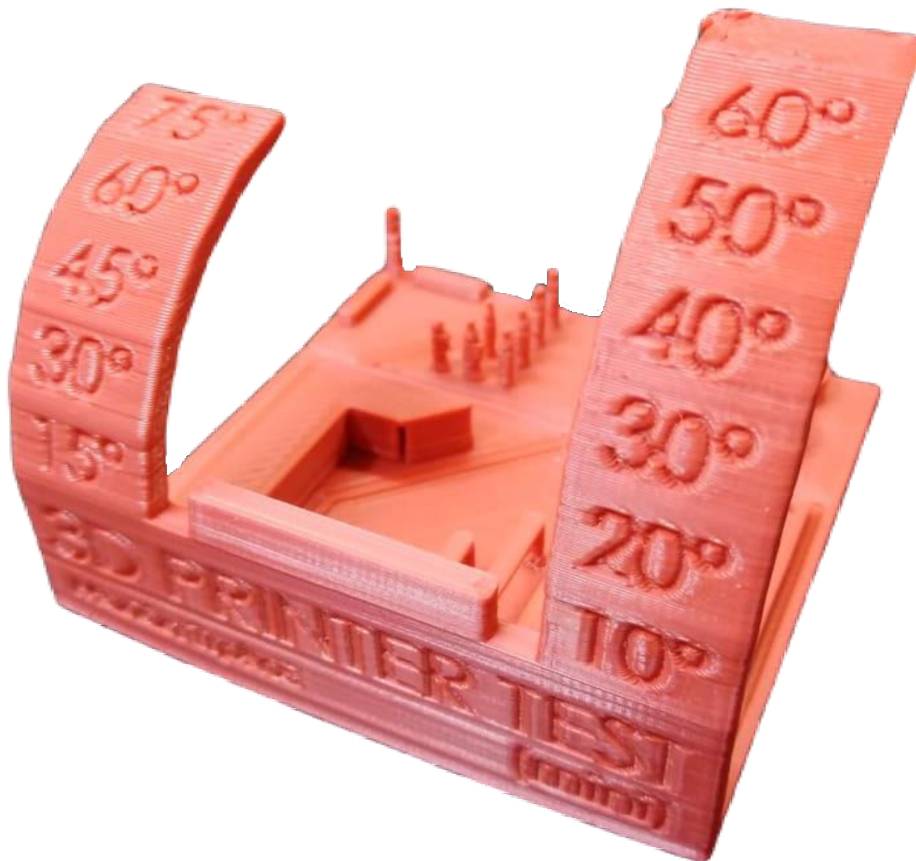
Prototyp je navržen na technologii tisku FDM, který umožňuje tisk materiálu ve formě tiskových strun z polymerů. Pro výrobu prototypu bylo vybíráno mezi materiály PLA a PET-G, jejich pevnostní vlastnosti jsou uvedeny v příloze P12. Nakonec byl zvolen filament z materiálu PLA pro svou jednoduchost tisku, pořizovací cenu a biologickou odbouratelnost, více informací o PLA filamentu je popsáno v kapitole 2.1 [53].

Pro tisk byl vybrán filament ENDER PLA od společnosti Creality s parametry [54]:

- průměr filamentu: 1,75 mm,
- pevnost v tahu: 60 MPa,
- hmotnost filament: 1 kg,
- tisková teplota: 200 °C,
- barva filamentu: červená,
- tolerance průměru: 0,03 mm,
- doporučená rychlost tisku: 50 mm/s,
- ekologicky nezávadný.

Filament byl otestován na testovacím výtisku (obr. 48), který slouží k zjištění ideálních parametrů pro nastavení tisku a vlastností filamentu při různém druhu použití. Hlavními parametry filamentu, na které bylo pohlíženo kvůli potřebám tisku jsou [3]:

- úhel převis materiálu bez tvorby podpor,
- odkapávání filamentu (stringování),
- přilnavost k tiskové podložce,
- přemostování (tažení filamentu mezi dvěma vystouplými body bez použití podpor).



Obr. 48 Test filamentu.

Podle testovacího výtisku lze usoudit, že testovaný filament dostatečně splňuje požadavek na přemostování v celkové maximální testované délce 25 mm, bez výrazného propadnutí nebo odkapávání materiálu. Déle byl nastaven úhel pro budování podpor na 55°, protože u větších úhlů docházelo ke stečení materiálu a nekonzistentním vrstvám a volba menšího úhlu by měla za následek větší spotřebu materiálu. Test na odkapávání filamentu dopadl velice úspěšně, jelikož nedošlo k žádnému odkapávání filamentu, které by muselo být odstraněno procesem postprocessingu. Neuspokojivě dopadl test přilnavosti k tiskové podložce, kdy docházelo ke zkroucení výtisku po vnější straně způsobeno nerovnoměrným zahříváním podložky. Tento problém je odstraněn odlehčením jednotlivých výtisků a zmenšením tak tiskové plochy výtisku. Všechny pořízené fotografie testovacího výtisku jsou zobrazeny v příloze P13.

Software pro nastavení parametrů tisku byl zvolen Ultimaker Cura 4.11.0, který je ideální volbou pro začínající tiskaře. Umožňuje zvolení konkrétní tiskárny a automatické nastavení jejích parametrů jako jsou např. velikost tiskové podložky nebo nastavení tiskové hlavy. V softwaru Ultimaker Cura lze taktéž nastavit tisknutý filament společně s jeho vlastnostmi a podle hmotnosti výtisku vypočítá cenu výtisku.

Všechny ozubená kola mají stejné nastavení tisku (tab. 5) s výjimkou generování podpor, které jsou zapnuty v případě kuželových kol. Zbylé části sestavy mají upravené parametry ovlivňující délku tisku a pevnost výtisku.

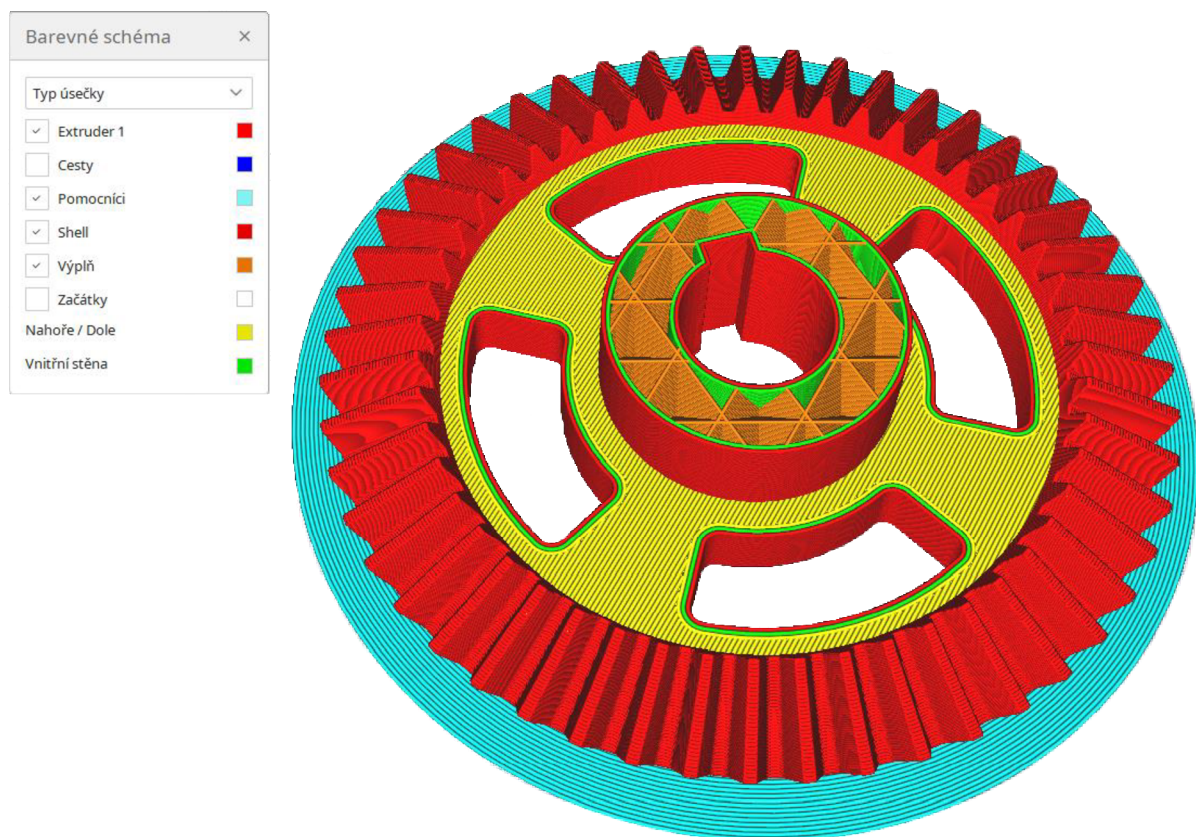
Tab. 5 Nastavení tisku.

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Výška vrstvy</b>	0,2 mm
<b>Tloušťka stěny</b>	1,2 mm
<b>Počet čar zdi</b>	2
<b>Vrchní/spodní tloušťka</b>	0,8 mm
<b>Počet vrchních/spodních vrstev</b>	4
<b>Hustota výplně</b>	20 %
<b>Výplňový vzor</b>	Krychle
<b>Teplota při tisku</b>	200 °C
<b>Teplota podložky</b>	50 °C
<b>Rychlost tisku zdi</b>	25 mm/s
<b>Rychlost tisku výplně</b>	50 mm/s
<b>Retrakce</b>	Povolena
<b>Rychlost větráku</b>	100 %
<b>Typ přilnavosti podložky</b>	Límeč



Pro tisk byla zvolena tryska o průměru 0,6 mm, která ovlivňuje dobu tisku a kvalitu tisku. Od průměru trysky se odvíjí výška vrstvy, při zvolení menšího průměru trysky je povrch detailnější a při větším průměru trysky jsou více viditelné vrstvy tisku. Jelikož je tisknuta spousta rozměrově velkých součástí, tak volba menší trysky by několika násobně prodloužila čas potřebný pro tisk všech součástí.

Pro lepší představu o průběhu tisku poskytuje software Ultimaker Cura funkci náhledu tisku po jednotlivých vrstvách (obr. 49). Tato funkce poskytuje uživateli lepší představu o průběhu tisku zvolené vrstvy společně s animací průběhu tisku celé vrstvy. Pomocí této funkce lze taktéž ověřit správnost průběhu tisku, pokud by došlo ke vzniku chyby tisku nebo nesplnění požadavků uživatele, lze tento problém eliminovat úpravou parametrů tisku podle potřeb výtisku nebo uživatele.



Obr. 49 Zobrazení průběhu tisku na kuželovém ozubeném kole hnaném.

## 7 TISK PROTOTYPU

Po dokončení preprocessingu následují zbylé dvě fáze výrobního procesu technologií 3D tisku. Tato kapitola se bude zabývat zbylými fázemi výrobního procesu, a to konkrétně processingem a postprocessingem. Processing lze rozdělit do postupných kroků a ty jsou výběr 3D tiskárny, příprava tiskárny a tisk. Poslední fází výrobního procesu je určena povrchovým úpravám výtisku tzv. postprocessingu, který se liší podle použité technologie. Technologie FDM, která je použita při výrobě součástí navržených v kapitole 6.1 až 6.2, disponuje postprocessingem, ve kterém jsou obsaženy procesy jako např. broušení, vyhlazování acetonem, lakování, lepení nebo laminování [3].

### 7.1 Výběr 3D tiskárny

Pro tisk všech ozubených kol a zbylých prvků sestavy byla zvolena technologie tisku FDM a 3D tiskárna Creality Ender 3 PRO (obr. 50). Tato tiskárna je ideální pro začínající tiskaře převážně díky své jednoduchosti obsluhy a údržby společně s nízkou pořizovací cenou vzhledem k ostatním tiskárnám. Hlavními komponenty této tiskárny jsou rám, tisková podložka, extruder, krokový motor a řídicí jednotka.



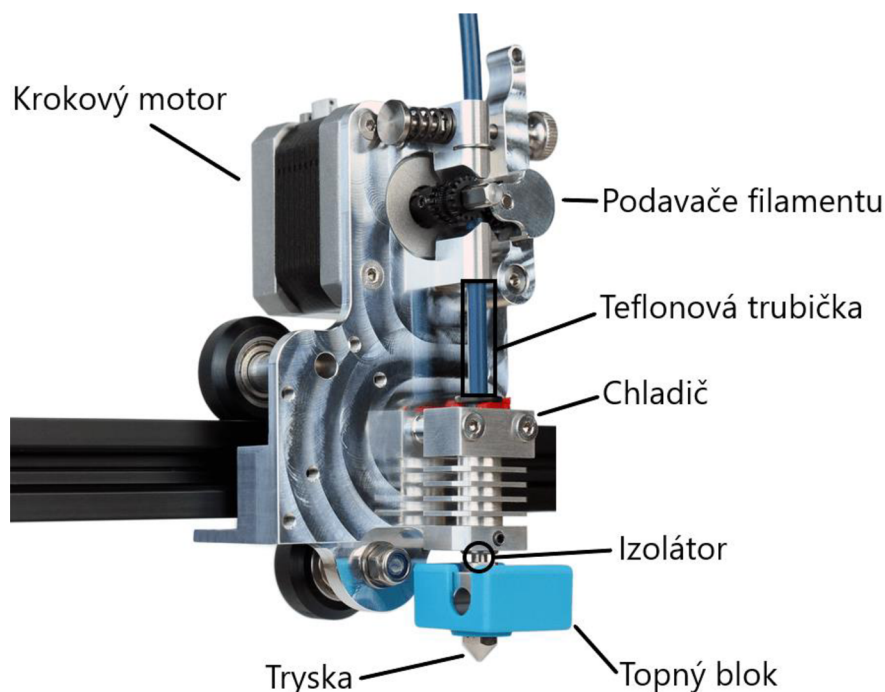
Obr. 50 FDM tiskárna Creality Ender 3 PRO [55].

Řídicí jednotka je srdcem celé tiskárny, jelikož má na starost chod celé tiskárny. Ovládá chod krokového motoru, zahřívání trysky společně s podložkou na základě textového souboru. Tento soubor je výstupem nastavených parametrů ze softwaru např. Ultimaker Cura následně je přenesen SD kartou do tiskárny. Rám tiskárny je nosnou konstrukcí všech komponent tiskárny. Jeho konstrukční provedení má vliv na kvalitu tisku. Výrobci tiskáren ve většině případů nabízejí dvě možnosti doručení tiskárny, a to buď zkompleťovanou nebo ve formě stavebnice. Pokud si zákazník zvolí druhou možnost a rozhodne se, že si tiskárnu zkompleťuje sám, což může mít při špatném zkompleťování zásadní vliv na kvalitu tisku [3].

Extruder a tisková podložka tiskárny Creality Ender 3 PRO se pohybuje v prostoru ve třech osách (X, Y, Z) a patří do kategorie kartézských tiskáren. Tento pohyb je uskutečněn krokovými motory. Další krokový motor pohání podavače filamentu do extruderu [3].

Tiskárny lze vylepšit přidáním nebo nahrazením komponent, které lze zakoupit nebo si je může uživatel tiskárny vytisknout. Tiskárna použita pro tisk všech prvků sestavy má nahrazenou původní magnetickou tiskovou podložku C-MAG podložkou Creality tvrzená skleněná podložka. Skleněné podložky obecně disponují lepší adhezí výtisku při zahřátí podložky a po vychladnutí podložky lze výtisk odstranit bez jakékoliv námahy případně použitím ručního nástroje (špachtle).

Posledním komponentem tiskárny je již několikrát zmiňovaný extruder, často také označován jako tisková hlava. Extruder je složen z několika komponent, pomocí kterých je zprostředkován tisk. Tiskárna Creality Ender 3 PRO má extruder MK8, okolo kterého jsou zabudované dva ventilátory. Pro lepší zobrazení a pochopení funkcí všech komponent byl vybrán Micro Swiss Direct Drive Extruder (obr. 51), který funguje na stejném principu a lze jím nahradit původní extruder MK8 [56].



Obr. 51 Micro Swiss Direct Drive Extruder [56].

Funkce jednotlivých komponent extruderu [3]:

- Krokový motor – pohání podavače filamentu.
- Podavače filamentu – dopravují filament do extruderu.
- Teflonová trubička – je jí dopravován filament v pevném stavu při pokojové teplotě.
- Chladič – odvádí teplo z izolátoru, aby omezil oblast pevného a roztaveného filamentu.
- Izolátor – omezuje přenos tepla mezi chladičem a topným blokem.
- Topný blok – je složen z termistoru a topného tělesa, které taví tiskový materiál a zahřívá trysku.
- Tryska – její velikost ovlivňuje kvalitu a délku tisku a je přes ni vytlačován roztavený materiál.

Tab. 6 Technické parametry 3D tiskárny Creality Ender 3 PRO [55].

Parametr	Hodnota
Tiskový prostor	220 × 220 × 250 mm
Tiskový materiál	PLA, PETG, ABS, Nylon, HIPS, ...
Výška tisknuté vrstvy	0,1 – 0,4 mm
Maximální teplota podložky	110 °C
Maximální teplota trysky	270 °C
Velikost tiskárny	440 × 410 × 4465 mm
Průměr filamentu	1,75 mm

## 7.2 Příprava tisku

Tiskárna Creality Ender 3 PRO nedisponuje funkcí automatického kalibrování tiskové podložky, proto se musí kalibrovat ručně. Ke kalibrování tiskové podložky slouží čtyři kalibrační šrouby umístěné pod podložkou. Před začátkem kalibrování je potřeba provést kontrolu trysky na které nesmí být zbytek filamentu v případě, že na trysce je zbytkový filament je potřeba trysku zahřát, filament odstranit a očistit trysku. Pomocí kalibračních šroubů umístit podložku do minimální Z-ové polohy otáčením kalibračních koleček proti směru hodinových ručiček.

Tisková podložka musí být zahřátá, aby se dostala do stavu jako při tisku, jinak pokud by byla kalibrována bez zahřátí, tak po zapnutí tisku by se mohla prohnout vlivem teplotní roztažnosti. Následně je potřeba automaticky najet s tiskovou hlavou do základní polohy a poté vypnout krokové motory pro osy X a Y aby byl umožněn posun tiskové hlavy rukou.

Posléze najíždět tryskou nad kalibrační šrouby kvůli zjištění nejbližší vzdálenosti mezi tryskou a tiskovou podložkou. Nad kalibračním šroubem nejbližší vzdálenosti pak nastavit kalibračním šroubem přibližně 0,5 mm vzdálenost trysky a tiskové podložky. Proces nastavení 0,5 mm vzdálenosti se opakuje pro každý kalibrační šroub ovšem při přejíždění nad tiskovou podložkou je potřeba dávat pozor, aby tryska nepřišla ke styku s tiskovou podložkou, protože by mohlo dojít k poškození jak trysky, tak tiskové podložky.

Ideální vzdálenost trysky a tiskové podložky se pak zjišťuje pomocí papíru vloženého mezi trysku a tiskovou podložku. Při otáčení kalibračního šroubu by měl papír lehce drhnout při jeho pohybu. Tento proces se pak opakuje pro všechny šrouby, dokud není tisková podložka nastavena. Správnost kalibrace si lze ověřit pomocí tisku devíti čtverců rozmístěných po podložce. Pokud jsou ve čtvercích mezery mezi jednotlivými dráhami tisku, tak musí být tryska více přiblížena k tiskové podložce. V případě, kdy se filament hromadí v rozích čtverců, tak to znamená, že tryska je moc blízko tiskové podložce.

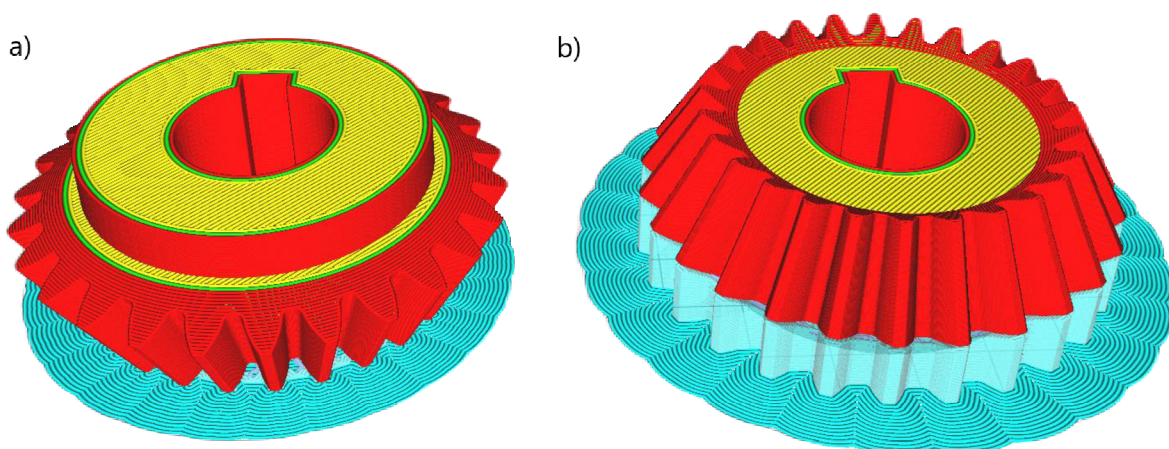
Tisková podložka musí být před zahájením tisku očištěna izopropylalkoholem kvůli zbavení nečistot a zlepšení přilnavosti materiálu k tiskové podložce. Během tisku je důležité sledovat alespoň tisk první vrstvy, protože zde dochází nejčastěji k chybám tisku např. odlepení filamentu od tiskové podložky. Lze to opravit opětovným kalibrováním tiskové podložky, vyčištění podložky nebo použitím přípravku pro zlepšení přilnavosti výtisku k podložce.

### 7.3 Proces tisku

Po dokončení kalibrace a vyčištění tiskové podložky zbývá předposlední krok k dokončení prototypu. Před zahájením tisku je zapotřebí použít funkci automatického najetí tiskové hlavy do základní polohy, po najetí nastavit přehřev trysky a tiskové podložky na požadovanou teplotu. V tomto případě při tisku ozubených kol je teplota trysky nastavena na 200 °C a teplota tiskové podložky 50 °C. Z extruderu během procesu zahřívání je vytlačěn filament, který je nutné odstranit, jelikož by mohlo dojít během tisku k přilepení filamentu na trysku.

Jakmile jsou dosaženy požadované teploty, tak v hlavní nabídce 3D tiskárny se vybere soubor s připraveným modelem ve formátu G-kódu, který je do tiskárny přenesen prostřednictvím SD karty. Po zvolení požadovaného modelu tiskárna začne načítat G-kód modelu a spustí proces tisku. Během celého procesu je nezbytně nutné ponechat SD kartu v tiskárně, jelikož pokud by byla vytažena, tiskárna přestane dostávat informace o modelu a dojde k zničení modelu.

Poloha ozubených kol vůči tiskové podložce byla situována, tak aby ozubená kola bylo možno vytisknout bez podpor. Toto ovšem neplatí pro kuželové kolo hnací, u kterého z důvodu osazení byly generovány podpory. Pro kuželové kolo hnací byly vybrány dva způsoby polohy při tisku s podporami (obr. 52) a jeden způsob bez podpor pro zjištění, při které poloze má kuželové kolo nejlepší kvalitu tisku.



Obr. 52 Poloha vygenerovaných podpor kuželového kola hnacího a) zevnitř, b) zvenku.

Při tisku bez podpor došlo ke vzniku vad tisku na profilu zubu, stékání filamentu na převislých plochách, nekompletnímu vytištění vrchních vrstev a rozdílným průměrům vytištěných vrstev otvoru pro hřídel. Z těchto důvodů bylo od tohoto řešení upuštěno. Z polohy kuželového kola, kde je osazení v kontaktu s tiskovou podložkou (obr. 52b), bylo taktéž upuštěno, neboť došlo ke vzniku vad na zubech, vrchní vrstvě výtisku a tento tisk doprovází zdoluhavé odstranění podpor, které zanechaly viditelné stopy na povrchu výtisku. Tento způsob se zprvu zdál jako nejlepším řešením pro tisk, jenže vlivem vad tisku byl zamítnut.

Poslední testovaný způsob tisku měl vygenerované podpory zevnitř ozubeného kola (obr. 52a). U tohoto řešení vznikly vady na špičce zubů, které byly vlivem vytištěného límce rozšířeny, a kvality povrchu po odstranění podpor. Způsobené vady byly částečně odstraněny během postprocessingu a nijak neomezovaly chod soukolí. Průměry jednotlivých vrstev otvoru

pro hřídel byly celistvé. Na základě menšího počtu vad a lepšího povrchu profilu zubů vzhledem k předešlým způsobům tisku byl tento vybrán pro kuželové kolo hnací (obr. 53).



Obr. 53 Vytištěné kuželové ozubené kolo hnací.

Na zbylých vytištěných kolech nevznikly vady, které by nebylo možné odstranit. Rozdílná kvalita profilu zubů vytištěných kol je způsobena tím, že čelní ozubení má vytištěné zuby směrem přímo vzhůru a povrch profilu je tak celistvý, kdežto kuželové ozubení má vytištěné zuby směrem šikmo vzhůru a jsou na zubech viditelné jednotlivé rozdíly vrstev. Průběh tisku vybraných součástí je zobrazen v příloze P14.

## 7.4 Postprocessing

Posledním krokem před zkompletováním sestavy je postprocessing. V této fázi procesu dochází k odstranění přebytečného filamentu, který se vytiskne kolem modelu kvůli lepší přilnavosti modelu k podložce, broušení funkčních ploch a hran. Malé výtisky byly odstraněny z tiskové podložky rukou, u větších musela být použita špachtle. Většina výtisků byla odstraněna ihned po dokončení tisku, aby mohl být následně spuštěn další tisk, ovšem pokud by došlo k ponechání tiskové podložky vychladnout, tak i velké výtisky by šli odstranit rukou.

Největší pozornost při odstraňování přebytečného filamentu a broušení byla věnována zubům ozubených kol, hřídelům, perům, perodrážkám a otvorům pro hřídel. Bez dostatečných úprav by nebylo možné zkompletovat sestavu, jelikož rozměry výtisků jsou ovlivněny výrobními tolerancemi tiskárny, technickým stavem tiskárny a tolerancemi filamentu. U některých výtisků byla naměřen rozdíl rozměrů modelu a výtisku až 0,3 mm.

### 7.4.1 Ozubená kola

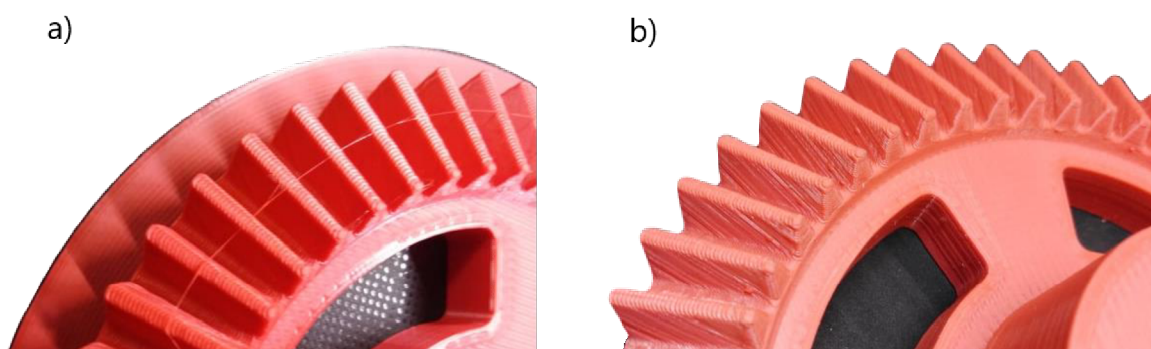
Postup postprocessingu ozubených kol bude popsán pro vytištěné kuželové ozubené kolo hnané (obr. 54). Po vytištění a odstranění výtisku z podložky byl odstraněn přebytečný filament kolem výtisku (límeč), tento filament lze částečně odstranit ručně, s tím že zůstane malá část filamentu na okraji výtisku. U čelních ozubených kol se tento filament vyskytuje okolo zubů a musí se pečlivě odstranit, protože by zamezoval správnému záběru zubů. Odstranění přebytečného filamentu bylo provedeno ručním odřezáním nožem. Následně tyto okraje byly ručně broušeny brusnými papíry P80, P150 a P600. U PLA materiálu je velice rizikové použití ruční brusky, které vede k nenávratnému poškození výtisku.

Na kuželovém kolu hnaném jako jediném došlo k odkapávání filamentu (stringingu) (obr. 55a). Toto odkapávání filamentu bylo minimální a pro jeho odstranění stačil ruční plynový hořák z dostatečné vzdálenosti, aby došlo k odstranění filamentu, ale nedošlo k poškození výtisku, protože PLA filamenty jsou velice náchylné na teplo a měknou už při teplotě okolo 50 °C. U kuželových docházelo k hromadění filamentu na vnitřním hlavové průměr a lze jej odstranit

už při návrhu kuželového ozubení tím, že se zkosí zuby na vnitřním hlavovém průměru, tak aby zkosení bylo rovnoběžné s tiskovou podložkou a mělo větší plochu nebo stejnou plochu, jako je tloušťka jedné tiskové vrstvy. Po obvodu čelních ozubených kol zůstávala jedna tisková vrstva po odstranění límce, která pro hnací čelní kolo nepředstavovala problém zamezující plynulosti chodu, jelikož toto kolo má navrženou větší tloušťku zubu než spoluzabírající kolo. Jelikož čelní kolo hnané má celou šířku zubu v záběru musel být tato vrstva pečlivě odstraněna, protože zamezovala plynulému záběru a nakláněla toto kolo vzhledem k jeho hlavní ose. Na kuželovém kolu (obr. 55b) byl úspěšně odstraněn přebytečný filament bez známky poškození kola.



Obr. 54 Vytištěné kuželové ozubené kolo hnané.



Obr. 55 Zuby kuželového kola a) před, b) po odstranění přebytečného filamentu.

#### 7.4.2 Hřídele

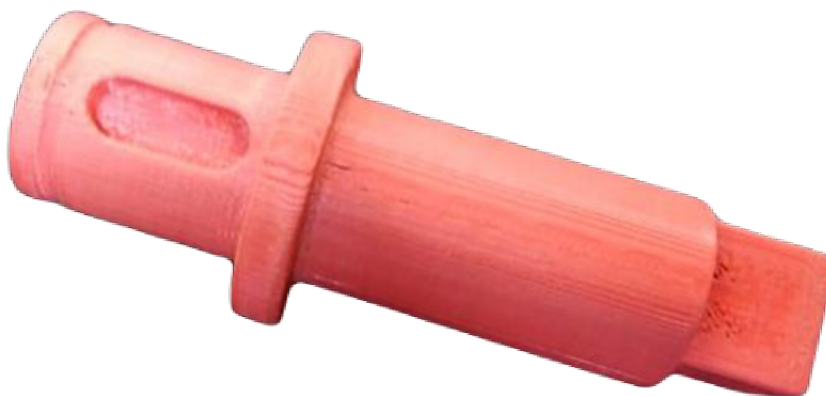
Poloha hřídelů vůči tiskové podložce byla zvažována taktéž ve třech. V prvním případě byla zvažována varianta tisku hřídelů po segmentech, rozdělený podle průměrů, a následně tyto části složit. Problém této varianty nastává při složení, neboť každá část má svou výrobní toleranci, které způsobí větší zvětšení hřídele, než pokud je tisknuta v celku, a taktéž tuto variantu doprovází zdlouhavý postprocessing každého segmentu.

Při druhém způsobu byla hřídel umístěna vertikálně. Povrch této hřídele byl velice kvalitní v místech, kde nebyly umístěny podpory. Tento způsob byl zamítnut, neboť u rozměrově dlouhých hřídelí došlo k odlepení od podložky nebo zbertění a povrch, ze kterého byly odstraněny podpory byl velice nekvalitní a odstraňování stop po podporách by bylo velice náročné a zdlouhavé.

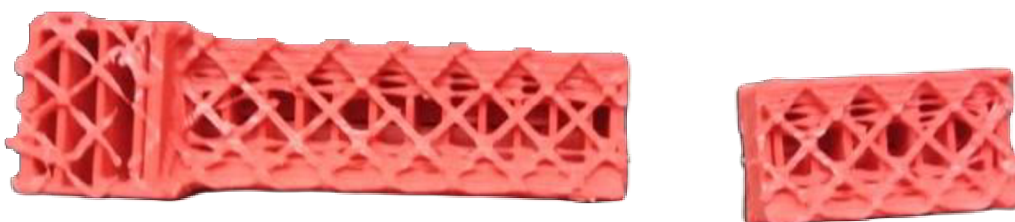
Případ, který byl vybrán pro tisk hřídelů, měl umístěnou tištěnou hřídel vertikálně (obr. 56). Tisk tímto způsobem měl dostatečnou kvalitu povrchu funkčních ploch, které byly následně ručně broušeny společně s místy kde byly umístěny podpory (obr. 57). Oproti předešlým variantám byly perodrážky vytištěny, tak že nebylo potřeba je dále brousit a pera šla do nich zasadit bez problémů. Dokončená vstupní hřídel (obr. 58) splňuje všechny potřebné požadavky pro použití. Zbylá ozubená kola jsou společně s hřídeli zobrazeny v příloze P15.



Obr. 56 Vytištěná vstupní hřídel.



Obr. 57 Dokončená vstupní hřídel.

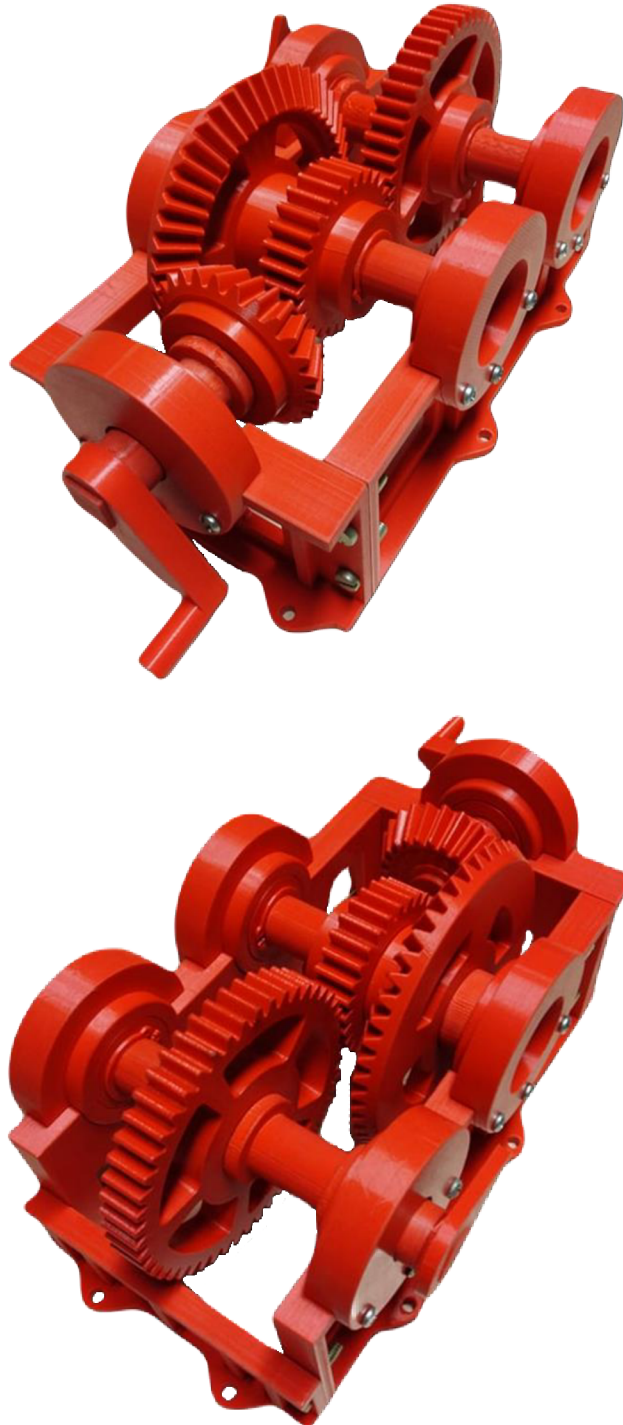


Obr. 58 Odstraněné podpory ze vstupní hřídele.



### 7.4.3 Kompletace

Vytištěné součásti jsou po postprocessingu připraveny ke kompletaci sestavy (obr. 59). Celá kompletace je poměrně jednoduchá. V první řadě je potřeba spojit všechny části převodové skříně kromě krytů konců hřídelů pomocí šroubů. Ozubená kola jsou uložena na hřídele společně s pery a ložisky, jejich uložení lze provést ručně popřípadě použitím gumové palice. Ozubená kola a ložiska jsou zajištěna pojistnými kroužky. Takto sestavené hřídele se uloží do převodové skříně, kde se zajistí kryty konců hřídelů, které jsou připevněny šrouby.



Obr. 59 Zkompletovaná sestava.

## 8 ZHODNOCENÍ

Tato kapitola se bude zabývat zhodnocením vytištěné sestavy a porovnáním s jinými materiály určenými pro tisk ozubených kol metodou FDM. Porovnávanými materiály jsou nylon PA12 od výrobce Fiberlogy a iglidur i190–PF od výrobce Igus. Vybrané materiály se vyznačují zvýšenou odolností vůči opotřebení a provozním teplotám vzhledem k běžně používaným materiálům pro tisk jako jsou např. ABS nebo PET–G. Technická data filamentu Creality PLA jsou popsány v kapitole 6.4 [57; 58].

Technická data filamentu iglidur i190–PF [57]:

- průměr filamentu: 1,75 mm,
- pevnost v ohybu: 75 MPa,
- hmotnost filament: 750 g,
- tisková teplota: 270–280 °C,
- tolerance průměru:  $\pm 0,02$  mm,
- maximálně dlouhodobě působící teplota: 90 °C,
- maximálně krátkodobě působící teplota: 120 °C,
- hustota: 1370 kg/m<sup>3</sup>,
- cena jednoho filamentu: 2416,64 Kč.

Technická data filamentu nylon PA12 [58]:

- průměr filamentu: 1,75 mm,
- pevnost v tahu: 51 MPa,
- hmotnost filament: 750 g,
- tisková teplota: 255–270 °C,
- tolerance průměru:  $\pm 0,02$  mm,
- teplota tání: 180 °C,
- hustota: 1020 kg/m<sup>3</sup>,
- cena jednoho filamentu: 1007,00 Kč.

### 8.1 Porovnání materiálů

Porovnání materiálů je zaměřeno na cenu a hmotnost jednotlivých ozubených kol (tab. 7, 8). Porovnání doby tisku nebylo provedeno, protože výrobci těchto dvou filamentů neuvádějí doporučenou rychlost tisku, a proto by materiály musely být prvně otestovány pro zjištění ideální rychlosti tisku. Pro zjištění ceny a hmotnosti ozubených kol byl použit software Ultimaker Cura 4.11.0, který byl použit pro přípravu tisku a zároveň se vstupními parametry pro tiskárnu poskytuje informaci o ceně a hmotnosti výtisku.

Tab. 7 Porovnání ceny výtisku za jedne kus.

Součást	PLA [Kč]	PA12 [Kč]	iglidur i190–PF [Kč]
<b>Kuželové ozubené kolo hnací</b>	5,89	21,85	70,42
<b>Kuželové ozubené kolo hnané</b>	14,70	56,00	180,48
<b>Čelní ozubené kolo hnací</b>	7,37	28,09	90,54
<b>Čelní ozubené kolo hnané</b>	13,63	51,91	167,31
<b>Celková cena ozubených kol</b>	41,59	157,85	508,75

Tab. 8 Porovnání hmotnosti jednoho výtisku.

Součást	PLA [g]	PA12 [g]	iglidur i190–PF [g]
<b>Kuželové ozubené kolo hnací</b>	20	16	22
<b>Kuželové ozubené kolo hnané</b>	51	42	56
<b>Čelní ozubené kolo hnací</b>	26	21	28
<b>Čelní ozubené kolo hnané</b>	47	39	52
<b>Celková hmotnost ozubených kol</b>	144	118	158

Z výsledků lze vidět, že náklady na vytištění ozubených kol jsou nejmenší u PLA filamentu. To byl jeden z hlavních požadavků na tvorbu prototypu, aby vytištěná sestava měla nízké pořizovací náklady. Pokud by byl zvolen iglidur i190–PF a došlo během tisku k chybě nebo nenávratnému poškození výtisku celá výroba by se prodražila. U PLA filamentu tisk nového dílu, který nahradí poškozený díl, není tak finančně náročná jako u zbylých filamentů.

Požadavek na hmotnost sestavy nebyl zásadní pro výběr materiálu filamentu, protože polymery disponují menší hmotností než kovy. Lze si povšimnout poklesu celkové hmotnosti ozubených kol vyrobených z PA12 oproti PLA o 18%, tento pokles je způsoben nízkou hustotou, kterou se vyznačují nylonové filamenty. Filament iglidur i190–PF na základě porovnání obstál nejhůře z trojice filamentů, ovšem tento filament byl vyvinut firmou Igus tak, aby měl co nejlepší vlastnosti pro mechanické aplikace. Proto se jeho cena pohybuje výše než u ostatních filamentů a je doporučeno, pro domácí uživatele FDM tisku, v případě zájmu tisku z tohoto filamentu využít služeb firmy Igus, která po vložení souboru s modelem ve formátu STL celý tisk zprostředkuje společně s postprocessingem. V postprocessingu je zahrnuto vystružení otvorů s tolerancí +0,05 mm, vyřezání metrických závitů nebo individuální zpracování na požadavek zákazníka. Nylon PA12 a celkově nylonové filamenty jsou nejčastěji využívané domácími tiskaři pro tisk mechanických součástí.

## 8.2 Doba tisku sestavy

Čas potřebný pro tisk sestavy (tab. 9) lze ovlivnit volbou trysky nebo úpravou parametrů tisku. Prvně lze však ovlivnit dobu potřebnou pro tisk už při návrhu modelu, a to jeho rozměry tzn. čím větší a členitější model tím bude doba tisku delší. Dále je hodně ovlivněna doba tisku volbou trysky, kde volba průměru trysky může znamenat rozdíl i několika hodin potřebných pro tisk. Volba většího průměru trysky má sice daleko menší čas tisku a lepší mechanickou odolnost výtisku, ovšem je to vykompenzováno horší kvalitou povrchu.

Tab. 9 Čas potřebný pro tisk jednotlivých součástí a jejich hmotnost.

Součást	Čas tisku jednoho kusu [min]	Kusů	Hmotnost jednoho kusu [g]
<b>Kuželové ozubené kolo hnací</b>	169	1	20
<b>Kuželové ozubené kolo hnané</b>	285	1	51
<b>Čelní ozubené kolo hnací</b>	152	1	26
<b>Čelní ozubené kolo hnané</b>	293	1	47
<b>Ložisko</b>	62	5	12
<b>Hřídel vstupní</b>	90	1	13
<b>Hřídel výstupní</b>	154	1	23
<b>Hřídel</b>	125	1	20
<b>Boční kryt převodové skříně</b>	302	2	56
<b>Přední kryt převodové skříně</b>	229	1	42
<b>Zadní kryt převodové skříně</b>	125	1	21
<b>Kryt konce hřídele</b>	84	3	16
<b>Kryt vstupního/výstupního hřídele</b>	83	2	16
<b>Pojistný kroužek</b>	3	5	1
<b>Pero 6 × 6 × 20</b>	6	2	1
<b>Pero 6 × 6 × 50</b>	9	1	2
<b>Klika</b>	45	1	7
<b>Šipka</b>	19	1	3

Čas tisku všech součástí je 50 hodin a 54 minut. Do tohoto času není započítán čas přípravy tisku, který se liší podle toho, zda byla tryska společně s tiskovou podložkou předehřátá z předchozího tisku nebo bylo potřeba tyto komponenty teprve zahřát. U použité tiskárny trval nejdéle předehřev tiskové podložky, ovšem tento proces netrval nikdy déle než 5 minut. Čas potřebný pro přípravu tisku také zahrnuje výběr modelu, nastavení teploty trysky, tiskové podložky a očištění podložky před tiskem. Tyto kroky přípravy tisku se dají stihnout v rozmezí od 1 do 2 minut, navíc součásti, které nejsou rozměrově veliké a vyskytuje se jich více kusů v sestavě byly tisknuty ve více kusech najednou jako např. pojistné kroužky, ložiska nebo pera.

Do celkového času není také započítán čas postprocessingu, který byl vykonáván během tisku další součásti a pro každou součást je individuální v závislosti na kvalitě výtisku a účelu použití v sestavě. Postprocessing ozubených kol trval déle kvůli tomu, že je zde kladen nárok na kvalitu zubů, aby docházelo k plynulému záběru, kdežto např. u pojistných kroužků se postprocessing zabýval pouze odstraněním límce a jeho čas se pohyboval maximálně do dvou minut všech kusů.

### 8.3 Doporučení

V případě, kdy by se jednalo o polymerová ozubená kola, které by měla nahradit ozubená kola z kovu, by bylo vhodnější použít nylonové materiály případně materiály od firmy Igus, které jsou určeny pro tyto účely. Pokud by byl použit materiál PLA při dlouhodobém provozu a také vyšších otáčkách došlo by k poškození ozubených kol, proto PLA materiál slouží u mechanických spíše k vytvoření prototypu.

Pro by byly vyrobeny aditivní technologií pouze ozubená kola a zbytek sestavy konvenčními metodami obrábění v kombinaci s použitím normalizovaných součástí, došlo by k eliminaci většího počtu výrobních nepřesností vzniklých 3D tiskem. Při použití normalizovaných radiálních ložisek by nedocházelo k naklánění hřídele vzhledem k ose. Tento problém vzniká u vytištěných ložisek, neboť jsou vytištěny jako celek, a proto musí být mezi jednotlivými kroužky mezera, aby nedošlo k spečení materiálu. U všech hřídelů kromě vstupní je tento problém eliminován použitím ložiska na každém konci hřídele. Vstupní hřídel je uložen pouze v jednom ložisku a dochází zde k náklonu vzhledem k ose, který vzniká při otáčení klíčkou.

Při tisku ozubených kol, ložisek a hřídelů pro zajištění lepší kvality povrchu by bylo vhodnější použít trysku o průměru 0,4 mm. Pro tisk zbylých součástí sestavy by stačilo použít trysku o průměru 1 mm, čímž se sice zhorší povrch, ale urychlí se tisk. Taktéž by bylo vhodné zkosení zubů kuželových ozubených kol, které je popsáno v kapitole 7.4.1, aby nedocházelo k hromadění vytištěného materiálu na vnitřním hlavovém průměru zubů.

---

## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo sestrojít ozubené soukolí a zprostředkovat jeho výrobu prostřednictvím aditivní technologie. Celý proces začínal u návrhu dvojice ozubených soukolí na základě vstupních požadavků na snížení otáček společně se změnou polohy os vstupního hřídele a výstupního hřídele se zachováním směru otáčení použitím kombinace čelních ozubených kol a kuželových ozubených kol s přímými zuby. Dalším požadavkem bylo vyrobení sestavy převodové skříně metodou FDM kromě spojovacích prvků.

Pro návrh čelního ozubení byl použit generátor komponent, který je součástí programu Inventor. Návrh kuželového soukolí byl proveden programem MITCalc, který nabízí komplexnější návrh a úpravu ozubených kol. Modely kuželových soukolí sestrojeny z náčrtů vygenerovaných programem MITCalc měly přesněji vygenerovaný profil zubu, než kuželové soukolí sestrojené generátorem komponent programu Inventor. Zbylé komponenty sestavy byly navrženy s ohledem na minimalizaci doby tisku a rozměry tiskové podložky. Problém při návrhu nastal při tvorbě ložisek, neboť klasická normalizovaná radiální ložiska nebylo možné vytisknout jako celek. Proto byla pro tuto práci navržena ložiska fungující na podobném principu jako kluzná ložiska. U hřídelů byly otestovány tři způsoby orientace hřídele vůči tiskové podložce pro zjištění, při kterém pozicování dosahuje výtisk dostatečné kvality. Hnaná ozubená kola byla odlehčena za účelem zamezení kroucení výtisku na tiskové podložce a úspore materiálu, které je u hnaného čelního ozubeného kola 14,8 % a u kuželového 5,5 %.

Příprava výrobního tisku zahrnuje volbu materiálu, kterým byl zvolen PLA filament, výběr tiskárny, nastavení parametrů tisku a kalibraci tiskové podložky. Parametry tisku byly zvoleny tak, aby tisk prototypu nebyl zdlouhavý a ozubená kola měla dostatečnou kvalitu při které by nedošlo k narušení plynulosti chodu. Pro tisk byla vybrána tiskárna Creality Ender 3 PRO, které nedisponuje automatickou nivelací tiskové podložky, a proto musela být tisková podložka ručně kalibrována, aby nedošlo k nerovnoměrnosti vytištěných vrstev. Poslední částí procesu výroby 3D tiskem byly dokončovací operace prováděny za účelem zlepšení kvality povrchu a odstranění přebytečného vytištěného materiálu. Zde byl kladen největší nárok na úpravu povrchu funkčních součástí převážně ozubená kola aby nebyla narušena plynulost záběru ozubených soukolí.

Poslední část této práce se zabývá zhodnocením výtisků a porovnáním použitého materiálu PLA s materiály používajícími se pro tisk mechanických součástí. Použití PLA filamentu bylo dosaženo nižších pořizovacích nákladů a celkové ceny celé sestavy než při použití porovnávaných filamentů. Zkompletovaná převodová skříň splňuje požadavky na prototyp sloužící k demonstraci a lepšímu pochopení ozubených převodů a problematiky 3D tisku.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. 3D tisk: Vše o 3D tisku. In: FutLab.cc [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://futlab.cc/3d-tisk/>
2. 3D tisk v kostce. In: Materialpro3d.cz [online]. Česká, 2016 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>
3. STŘÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. Základy 3D tisku s Josefem Průšou [online]. Praha: Prusa Research a.s., 2019 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: [https://www.prusa3d.com/cs/stranka/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi\\_490/](https://www.prusa3d.com/cs/stranka/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi_490/)
4. Export do souborů pro 3D tisk. In: Solidworks Web Help [online]. Dassault Systemes, c1995-2022 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: [http://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/sldworks/t\\_exporting\\_3D\\_print\\_files\\_impexp.htm](http://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/sldworks/t_exporting_3D_print_files_impexp.htm)
5. Příprava 3D tisku z termoplastů. In: 3D wiser [online]. 3Dwiser s.r.o., c2014-2022 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/software/>
6. Tipy a triky pro stolní 3D tisk: Jak postupovat při postprocessingu vytištěných modelů. In: Konstrukter.cz [online]. Vydavatelství Nová média, s. r. o., 2018 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/tipy-a-triky-pro-stolni-3d-tisk-jak-postupovat-pri-postprocessingu-vytistenych-modelu/>
7. 3D tisk podle odvětví. In: UPrint 3D [online]. Vědeckotechnický park Univerzity Palackého v Olomouci, 2019 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <http://www.uprint3d.cz/odvetvi/>
8. VANTA, David. Proč používat 3D tisk? Kde se dá využít?. In: Technologie budoucnosti [online]. 2019 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://technologiebudoucnosti.cz/proc-pouzivat-3d-tisk-kde-se-da-vyuzit/>
9. GAGET, Lucie. 3D printing for mechanical engineering. In: Sculpteo [online]. 2019 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2019/03/01/3d-printing-for-mechanical-engineering/>
10. 3D tisk domů: Kdy se bude týkat i vás?. In: For3Dtisk.cz [online]. 2022 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://for3dtisk.cz/3d-tisk-domu-blog/>
11. IVANKO, Miroslav. 3D tištěné implantáty v medicíně. In: Technický týdeník [online]. Business Media CZ s.r.o., 2018 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/medicinska-technika/3d-tistene-implantaty-v-medicine\\_45813.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/medicinska-technika/3d-tistene-implantaty-v-medicine_45813.html)
12. GREGURIĆ, Leo. History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented?. In: All3DP.com [online]. 2018 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>

- 
13. LONJON, Capucine. Discover the history of 3D printer. In: Sculpteo.com [online]. 2017 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>
  14. Our Story. In: 3dsystems.com [online]. 2022 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/our-story>
  15. HULL, Charles W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US4575330A. Uděleno 1986.
  16. First Commercially Successful Stereolithography Machine, Model SLA-1, 1987. In: The Henry Ford [online]. 2022 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.thehenryford.org/collections-and-research/digital-collections/artifact/242212#slide=gs-308680>
  17. 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?. In: Svět hardware [online]. oXyShop s.r.o., 2019 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>
  18. DORAZIL, Eduard. Nauka o materiálu I: přednášky. 3. vyd. Brno: VUT, 1989, 247 s. :obr., grafy ; 29 cm. ISBN 80-214-1028-0.
  19. BĚHÁLEK, Luboš. Polymery. Verze knihy: 15. [Online]: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3.
  20. Materiálový slovník. In: Materialpro3d.cz [online]. Materialpro3d.cz, 2022 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
  21. Stringování a odkapávání filamentu. In: Prusa Knowledge Base [online]. 2021 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/stringovani-a-odkapavani-filamentu\\_1805](https://help.prusa3d.com/cs/article/stringovani-a-odkapavani-filamentu_1805)
  22. Nylon. In: Prusa Knowledge Base [online]. Prusa Research a.s., 2021 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/nylon\\_167188](https://help.prusa3d.com/cs/article/nylon_167188)
  23. Nylon. In: MakerBot.cz [online]. MCAE Systems, s. r. o., 2021 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.makerbot.cz/produkty/nylon/>
  24. Resiny. In: Prusa Knowledge Base [online]. Prusa Research a.s., 2022 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/resiny\\_1977/](https://help.prusa3d.com/cs/article/resiny_1977/)
  25. KAUPPILA, Iie. The Best Metal 3D Printers – Buyer’s Guide. In: All3DP.com [online]. 2021 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/>
  26. Metal powders – the raw materials. In: MetalAM.com [online]. Inovar Communications Ltd, 2016 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/metal-powders-the-raw-materials/>
-



- 
27. PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. : il. ; 30 cm. ISBN 978-80-214-4025-8.
  28. MJF (Multi Jet Fusion). In: Cotu.cz [online]. 2022 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/138/mjf-multi-jet-fusion>
  29. Multi Jet Fusion. In: Materialise.com [online]. 2022 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/multi-jet-fusion>
  30. Multi Jet Fusion, MJF. In: Manufacturingguide.com [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/multi-jet-fusion-mjf>
  31. WOLF, Karel. Obrazem: Jak vypadá MJF tisková laboratoř 3Dees, kde se tiskly první RP95–3D respirátory. In: Lupa.cz [online]. 2020 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/obrazem-jak-vypada-mjf-tiskova-laborator-3dees-kde-se-tiskly-prvni-rp95-3d-respiratory/>
  32. Laminated Object Manufacturing (LOM). In: Custompartnet.com [online]. CustomPartNet, 2022 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
  33. Přehled technologií 3D tisku. In: Dkmetal.cz [online]. 2018 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
  34. Technologie 3D tisku. In: Na3d.cz [online]. 2020 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/technologie-3d-tisku>
  35. Stereolithography. In: Custompartnet.com [online]. CustomPartNet, 2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
  36. BEAMAN, Joseph J. a Carl R. DECKARD. Selective laser sintering with assisted powder handling. US4938816A. Uděleno 1990.
  37. SLS (Selective Laser Sintering). In: Cotu.cz [online]. 2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/126/sls-selective-laser-sintering>
  38. Selective Laser Sintering. In: Custompartnet.com [online]. 2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
  39. TECHNOLOGIE 3D TISKU. In: 3dtisk-online.cz [online]. 2020 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-technologie-3d-tisku/>
  40. DMLS. In: ČVUT Fakulta strojní [online]. ČVUT FS, c2014-2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/dmls-3dtisk/>
-

- 
41. Direct Metal Laser Sintering. In: Custompartnet.com [online]. 2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
  42. FDM. In: ČVUT Fakulta strojní [online]. ČVUT FS, c2014-2022 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/fdm-3dtisk/>
  43. PEŠÍK, Lubomír. Části strojů: stručný přehled. Vyd. 4., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. ISBN 978-80-7372-574-7.
  44. KRATOCHVÍLOVÁ, Helena, Jitka ŘEZNÍČKOVÁ a Jaroslav KŘIVÝ. Konstrukční prvky, Seš. 4. Seš. 4. Praha: ČVUT, 1994. ISBN 80-010-1175-5.
  45. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard Gordon BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
  46. Zubové profily. In: Studijní materiály nejen do strojírenství [online]. [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.com/2011/04/2551-zubove-profil.html>
  47. Technická data. In: Elesa-ganter.cz [online]. Elesa S.p.A, 2022 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.elesa-ganter.cz/cs/CatalogoMediaServicesCZE/technick%C3%A1-data>
  48. KOSÍŘ, Tomáš. Technologie výroby čelního ozubení [online]. Brno, 2012 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/6687>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.
  49. DOČKAL, Lubomír. Čelní válcová soukolí se šikmými zuby. In: Adoc.pub [online]. ADOC.PUB., 2013 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://adoc.pub/1411-elni-valcova-soukoli-se-iknymi-zuby.html>
  50. VONDRA, Tomáš. Výroba ozubení kuželového soukolí. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.
  51. ČSN 01 4608. Ozubená kola. Moduly. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1980.
  52. LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
  53. Rozdíl mezi ABS, PLA, PETG. In: Materialpro3d.cz [online]. 2017 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
  54. Creality tisková struna. In: Crealitystore.cz [online]. 2022 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.crealitystore.cz/produkt/creality-filament-ender-pla/>
-

55. 3D tiskárna Creality Ender 3 PRO. In: Levna3dtiskarna.cz [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.levna3dtiskarna.cz/3d-tiskarna-creality-ender-3-pro/>
56. Micro Swiss Direct Drive Extruder. In: Micro-swiss.com [online]. 2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://store.micro-swiss.com/products/micro-swiss-direct-drive-extruder>
57. Iglidur® i190-PF 3D print filament. In: Iigus.cz [online]. igus®, 2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.igus.cz/product/20322?artNr=I190-PF-0175-0750>
58. Nylon PA12. In: Materialpro3d.cz [online]. Materialpro3d.cz, 2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/nylon-filament/nylon-pa12-cerny-1-75mm-750g-fiberlogy/>
59. Prusa Tabulka Materiálů. In: Prusa Knowledge Base [online]. Prusa Research a.s., 2020 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/cs/materials>
60. DMLS MATERIALS. In: Forecast3d.com [online]. 2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.forecast3d.com/materials/dmls>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
$D_{ae}$	vnější hlavový průměr	[mm]
$D_{ai}$	vnitřní hlavový průměr	[mm]
$D_e$	vnější střední průměr	[mm]
$D_{fe}$	vnější patní průměr	[mm]
$D_i$	vnitřní střední průměr	[mm]
$L$	délka osazení	[mm]
$R_e$	vnější délka površky roztečného kužele	[mm]
$R_m$	střední délka površky roztečného kužele	[mm]
$V$	vrchol roztečného kužele	[mm]
$V_a$	vrchol patního kužele	[mm]
$V_f$	vrchol hlavového kužele	[mm]
$a$	osová vzdálenost	[mm]
$b$	šířka zubu	[mm]
$c$	hlavová vůle	[mm]
$d$	průměr roztečné kružnice	[mm]
$d_a$	průměr hlavové kružnice	[mm]
$d_b$	průměr základní kružnice	[mm]
$d_e$	vnější roztečný průměr	[mm]
$d_f$	průměr patní kružnice	[mm]
$d_i$	vnitřní roztečný průměr	[mm]
$d_m$	střední roztečný průměr	[mm]
$d_o$	průměr osazení	[mm]
$h_a$	výška hlavy zubu	[mm]
$h_{ae}$	vnější výška hlavy zubu	[mm]
$h_e$	vnější výška zubu	[mm]
$h_f$	výška paty zubu	[mm]
$h_{fe}$	vnější výška paty zubu	[mm]
$i$	převodový poměr	[-]
$m$	modul	[mm]
$m_{et}$	vnější čelní modul	[mm]
$m_{mt}$	střední čelní modul	[mm]
$m_n$	normálový modul	[mm]
$m_t$	čelní modul	[mm]
$n$	otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
$p$	rozteč zubů	[mm]
$p_t$	čelní rozteč	[mm]
$u$	převodové číslo	[-]
$v$	rychlost	[m·s <sup>-1</sup> ]
$z_i$	počet zubů	[-]
$\Sigma$	součet roztečných úhlů	[°]
$\alpha$	úhel záběru	[°]
$\alpha_n$	normálový úhel záběru	[°]
$\alpha_t$	čelní úhel záběru	[°]
$\beta$	úhel sklonu zubu	[°]
$\beta_m$	střední úhel sklonu boční křivky zubu	[°]
$\delta$	úhel roztečného kužele	[°]

---

$\delta_a$	ukazatel stavu napjatosti dle Kolmogorova	[°]
$\delta_f$	patní úhel roztečného kužele	[°]
$\vartheta$	úhel zubu	[°]
$\vartheta_a$	úhel hlavy zubu	[°]
$\theta_f$	úhel paty zubu	[°]
$\vartheta_f$	úhel paty zubu	[°]

### Zkratky

Označení	Legenda
3D	Trojdimenzionální prostor
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CAD	Počítačem podporované navrhování
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
ČSN	Česká technická norma
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
LCD	Displej z tekutých krystalů
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJF	Multi Jet Fusion
MSLA	Mask Stereolithography
PA	Polyamid
PET	Polyetylentereftalát
PET-G	Polyetylentereftalát – glykol
PLA	Kyselina polymléčná
PTFE	Polytetrafluoretylén
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Formát souboru pro stereolitografický přístroj
TPU	Termoplastický polyuretán
UV	Ultrafialové záření

---

---

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Domácí využití 3D tisku
Příloha 2	Tabulka vlastností PLA filamentů
Příloha 3	Tabulka vlastností ABS filamentů
Příloha 4	Tabulka vlastností PET-G filamentů
Příloha 5	Tabulka vlastností PA filamentů
Příloha 6	Srovnávací tabulka technických údajů materiálů pro DMLS
Příloha 7	Vypočítané hodnoty kuželového soukolí programem MITCalc
Příloha 8	Vypočítané hodnoty čelního soukolí programem Autodesk Inventor
Příloha 9	Vzorový pevnostní výpočet čelního soukolí generátorem komponent
Příloha 10	Parametry odlehčení čelního ozubeného kola hnaného
Příloha 11	Postup zkonstruování kuželového soukolí
Příloha 12	Obecné pevnostní vlastnosti PLA a PET-G filamentů
Příloha 13	Testovací výtisk
Příloha 14	Průběh tisku vybraných součástí
Příloha 15	Vytištěná ozubená kola a hřídele



Príloha 2  
Tabuľka vlastností PLA filamentů [59].

Materiál	Tisk se zakrytovanou tiskárnou	Doporučuje se drybox	Nutnost tvrzené trysky	Teplota trysky	Teplota podložky	Tisknutelné na texturovanou podložku	Tisknutelné na hladkou PEI podložku	Tisknutelné na saténovú podložku	Rozpusťné běžnými rozpouštědly	Teplotní odolnost	Rázová houževnatost Charpy	Odolnost v tahu	Cena
PLA	Ne	Ne	Ne	210 - 215 °C	60 °C	✓	✓	✓	✗				
AmazonBasics PLA	Ne	Ne	Ne	210 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform				495 Kč
Das Filament PLA	Ne	Ne	Ne	210 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	54 °C	16 kJ/m <sup>2</sup>	55 Mpa	603 Kč
EUMAKERS PLA	Ne	Ne	Ne	210 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	54 °C	13 kJ/m <sup>2</sup>	41 Mpa	863 Kč
Esun PLA	Ne	Ne	Ne	210 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	54 °C	16 kJ/m <sup>2</sup>	65 Mpa	581 Kč
Fiberlogy PLA	Ne	Ne	Ne	210 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	54 °C	15 kJ/m <sup>2</sup>	58 Mpa	542 Kč
Fillamentum PLA	Ne	Ne	Ne	210 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	54 °C	15 kJ/m <sup>2</sup>	50 Mpa	732 Kč
Floreon 3D PLA	Ne	Ne	Ne	210 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform				1011 Kč
Hatchbox PLA	Ne	Ne	Ne	210 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	56 °C	15 kJ/m <sup>2</sup>	46 Mpa	430 Kč
Plasty Mladec PLA	Ne	Ne	Ne	210 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	55 °C	16 kJ/m <sup>2</sup>	54 Mpa	479 Kč
Prusament PLA	Ne	Ne	Ne	215 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	55 °C	12 kJ/m <sup>2</sup>	57 Mpa	599 Kč
Verbatim PLA	Ne	Ne	Ne	210 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	50 °C	16 kJ/m <sup>2</sup>	63 Mpa	699 Kč
ColorFabb PLA-PHA	Ne	Ne	Ne	210 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform		30 kJ/m <sup>2</sup>	61 Mpa	1254 Kč
Devil Design PLA	Ne	Ne	Ne	215 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	55 °C	15 kJ/m <sup>2</sup>	59 Mpa	560 Kč
Overture PLA	Ne	Ne	Ne	215 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	53 °C	21 kJ/m <sup>2</sup>	29 Mpa	540 Kč
Spectrum PLA	Ne	Ne	Ne	215 °C	60 °C	✓	✓	✓	Toluen, EDC, THF, Chloroform	58 °C	15 kJ/m <sup>2</sup>	53 Mpa	580 Kč



Materiál	Tisk se zakrytovanou tiskárnou	Doporučuje se drybox	Nutnost tvrzené trysky	Teplota trysky	Teplota podložky	Tisknutelné na texturovanou podložku	Tisknutelné na hladkou PEI podložku	Tisknutelné na saténovou podložku	Rozpustné běžnými rozpouštědly	Teplotní odolnost	Rázová houževnatost Charpy	Odolnost v tahu	Cena
ABS	Ano doporučeno	Ne	Ne	240 - 255 °C	110 °C			✓	✓				
Esun ABS	Ano doporučeno	Ne	Ne	255 °C	110 °C			✓	Aceton				581 Kč
Fillamentum ABS	Ano doporučeno	Ne	Ne	240 °C	110 °C			✓	Aceton	81 °C	32 kJ/m <sup>2</sup>	39 Mpa	628 Kč
Hatchbox ABS	Ano doporučeno	Ne	Ne	255 °C	110 °C			✓	Aceton				430 Kč
Plasty Mladec ABS	Ano doporučeno	Ne	Ne	255 °C	110 °C			✓	Aceton	97 °C	30 kJ/m <sup>2</sup>	36 Mpa	479 Kč
Verbatim ABS	Ano doporučeno	Ne	Ne	255 °C	110 °C			✓	Aceton		21 kJ/m <sup>2</sup>	47 Mpa	605 Kč

Materiál	Tisk se zakrytovanou tiskárnou	Doporučuje se drybox	Nutnost tvrzené trysky	Teplota trysky	Teplota podložky	Tisknutelné na texturovanou podložku	Tisknutelné na hladkou PEI podložku	Tisknutelné na saténovou podložku	Rozpustné běžnými rozpouštědly	Teplotní odolnost	Rázová houževnatost Charpy	Odolnost v tahu	Cena
PETG	Ne	Ne	Ne	230 - 270 °C	90 °C	✓	⚠ s tyčinkovým lepidlem	✓	✗				
E3D Edge	Ne	Ne	Ne	240 °C	90 °C	✓	⚠ s tyčinkovým lepidlem	✓	DCM	77 °C	47 kJ/m <sup>2</sup>	51 Mpa	894 Kč
ColorFabb XT	Ne	Ne	Ne	270 °C	90 °C	✓	⚠ s tyčinkovým lepidlem	✓	DCM	75 °C	64 kJ/m <sup>2</sup>	48 Mpa	1219 Kč
Fiberlogy PETG	Ne	Ne	Ne	240 °C	90 °C	✓	⚠ s tyčinkovým lepidlem	✓	DCM	68 °C	42 kJ/m <sup>2</sup>	51 Mpa	606 Kč
Plasty Mladec PETG	Ne	Ne	Ne	240 °C	90 °C	✓	⚠ s tyčinkovým lepidlem	✓	Acetaldehyd, Benzen, DCM	70 °C	75 kJ/m <sup>2</sup>	37 Mpa	495 Kč
Prusament PETG	Ne	Ne	Ne	250 °C	90 °C	✓	⚠ s tyčinkovým lepidlem	✓	DCM	68 °C	no break	46 Mpa	699 Kč
Taulman T-Glase	Ne	Ne	Ne	240 °C	90 °C	✓	⚠ s tyčinkovým lepidlem	✓	THF, DCM	78 °C	79 kJ/m <sup>2</sup>	46 Mpa	908 Kč
Verbatim PETG	Ne	Ne	Ne	240 °C	90 °C	✓	⚠ s tyčinkovým lepidlem	✓	DCM	70 °C	34 kJ/m <sup>2</sup>	50 Mpa	605 Kč
Devil Design PETG	Ne	Ne	Ne	230 °C	90 °C	✓	⚠ s tyčinkovým lepidlem	✓	DCM	70 °C	24 kJ/m <sup>2</sup>	47 Mpa	480 Kč

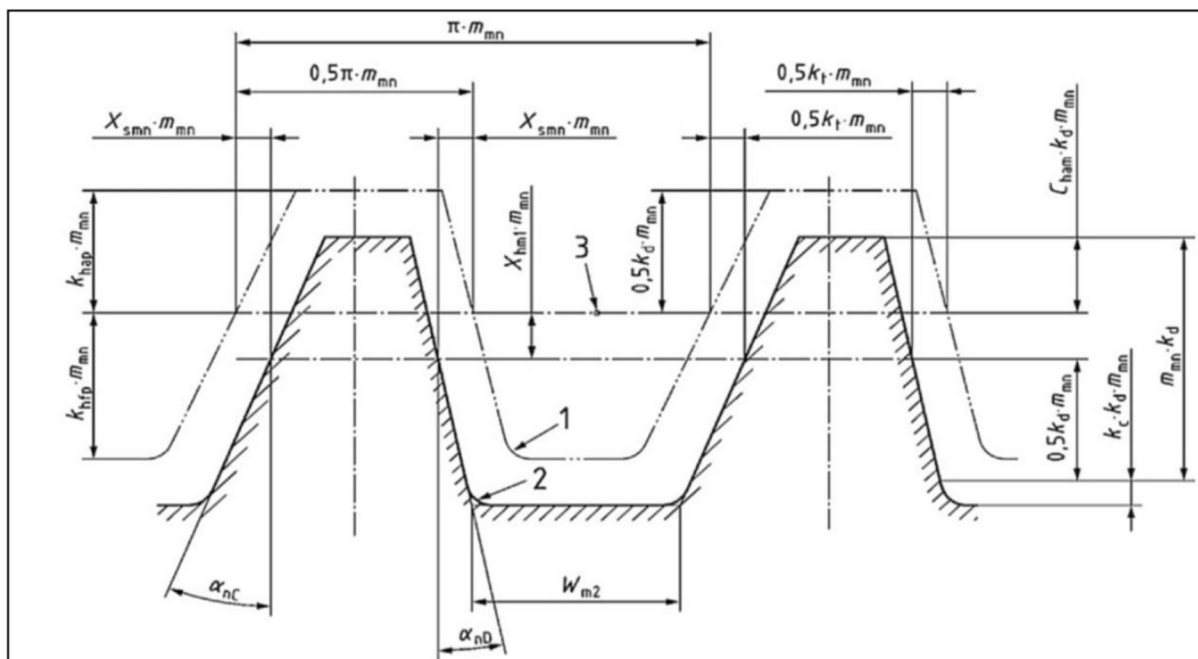
Příloha 5  
Tabulka vlastností PA filamentů [59].

Materiál	Tisk se zakrytovanou tiskárnou	Doporučuje se drybox	Nutnost tvrzené trysky	Teplota trysky	Teplota podložky	Tisknutelné na texturovanou podložku	Tisknutelné na hladkou PEI podložku	Tisknutelné na saténovou podložku	Rozpustné běžnými rozpouštědly	Teplotní odolnost	Rázová houževnatost Charpy	Odolnost v tahu	Cena
Nylon	Ano doporučeno	Ano	Ne	250 - 270 °C	75 - 90 °C	! s tyčinkovým lepidlem	✗ nedoporučeno	! s tyčinkovým lepidlem	✗				
Taulman Bridge	Ano doporučeno	Ano	Ne	250 °C	90 °C	! s tyčinkovým lepidlem	✗ nedoporučeno	! s tyčinkovým lepidlem	✗	76 °C	no break	27 Mpa	712 Kč
Fillamentum Nylon FX256	Ano doporučeno	Ano	Ne	250 °C	90 °C	! s tyčinkovým lepidlem	✗ nedoporučeno	! s tyčinkovým lepidlem	✗	110 °C	no break	45 Mpa	1816 Kč
Fiberthree F3 PA Pure Pro	Ano doporučeno	Ano	Ne	270 °C	75 °C	! s tyčinkovým lepidlem	✗ nedoporučeno	! s tyčinkovým lepidlem	✗	90 °C	28 kJ/m <sup>2</sup>	32 Mpa	4551 Kč

MATERIAL	TENSILE STRENGTH $R_M$ [MPA]	OFFSET YIELD STRESS $R_{P0.2}$ [MPA]	BREAK STRAIN A[%]	REDUCTION OF AREA Z[%]	E-MODUL $\Sigma$ [GPA]	HARDNESS BY VICKERS [HV10]	SURFACE ROUGHNESS $R_A$ [MM]	SURFACE ROUGHNESS $R_Z$ [MM]
17-4 <sup>1</sup>	832 ± 87	572 ± 25	31 ± 3	55 ± 4	155 ± 22	221 ± 4	9 ± 2	54 ± 15
AlSi10Mg <sup>2</sup>	397 ± 11	227 ± 11	6 ± 1	8 ± 1	64 ± 10	117 ± 1	7 ± 1	46 ± 8
Inconel 625 <sup>1</sup>	961 ± 41	707 ± 41	33 ± 2	51 ± 5	182 ± 9	285 ± 3	8 ± 1	57 ± 11
Inconel 718 <sup>1</sup>	994 ± 40	702 ± 65	24 ± 1	40 ± 7	166 ± 12	293 ± 3	7 ± 2	36 ± 8
316L <sup>1</sup>	633 ± 28	519 ± 25	30 ± 5	49 ± 11	184 ± 20	209 ± 2	10 ± 2	50 ± 12
CoCr <sup>1</sup>	1101 ± 78	720 ± 18	10 ± 4	11 ± 4	194 ± 9	375 ± 2	10 ± 1	64 ± 6
TiAL6V4 <sup>1</sup>	1286 ± 57	1116 ± 61	8 ± 2	30 ± 10	111 ± 4	384 ± 5	12 ± 1	70 ± 3

Vypočítané hodnoty kuželového soukolí programem MITCalc.

<b>1.0 <input checked="" type="checkbox"/> Volba základních vstupních parametrů</b>		
1.1 Jednotky výpočtu	SI Units (N, mm, kW...)	
0 Přenášený výkon	Pw	0,1000
1.3 Otáčky (pastorek / kolo)	n [/min]	100,00    52,00
1.4 Krouticí moment (pastorek / kolo)	T [Nm]	9,55    18,37
<b>Typ ozubení, materiál, zatížení</b>		
1.5 Typ ozubení	1. Standardní přímé ozubení - Metoda 0	
1.6 Koeficient pro ozubení přímé a Zerol	SZF	1,20    1,20 <input checked="" type="checkbox"/>
1.7 Materiál pastorku / kola	Cementovaná ocel 55HRC / Tepelně zpracovaná ocel 250-300HBW (KM=	
1.8 Materiálový koeficient	KM	1,45    1,45 <input checked="" type="checkbox"/>
1.9 Přesně dokončovaná kola	PFG	1,00    Ne <input type="checkbox"/>
1.10 Typ zatížení	Dynamické zatížení (LTF=1.00)	
1.11 Koeficient zatížení	LTF	1,00    1,00 <input checked="" type="checkbox"/>
1.12 Stupeň přesnosti - ISO1328	4 - 7 <input type="checkbox"/>	
<b>2.0 <input checked="" type="checkbox"/> Předběžný / přibližný výpočet geometrie</b>		
2.1 Převodový poměr / z tabulky	u	1,8000    *1.80 <input type="checkbox"/>
2.2 Doporučený (minimální) počet zubů pastorek / kolo	z1 / z2	18 (>12)    32
2.3 Počet zubů pastorek / kolo	z1 / z2	26    50 <input type="checkbox"/>
2.4 Skutečný převodový poměr / odchylka	u	1,9231    6,40%
2.5 Úhel os hřídelí	Sigma	90,00
2.6 Přesazení os / max. hodnota (25% de2)	a	0,000    = 0
2.7 Vnější roztečný průměr	de1,2	43,2258    83,1265
2.8 Tečný modul (vnější) / Vnější rozteč DP	met, DP	1,6625    15,2779
2.9 Úhel roztečného kužele	delta1,2	27,474    62,526
2.10 Délka površky roztečného kužele (vnější)	Re1,2	46,8468    46,8468
2.11 Šířka ozubení / max. doporučená hodnota	b1	5,3100    < 14,05 <input type="checkbox"/>
2.12 Základní úhel sklonu zubů	betam	0,00    = 0 <input checked="" type="checkbox"/>
2.13 Součinitel záběru	epsilonbeta	0,000    0,000
<b>3.0 <input checked="" type="checkbox"/> Vstupní údaje parametrů profilu zubu (použité ve všech výpočtových metodách)</b>		
3.1 Nominální hodnota úhlu záběru zabírající bok / nezabírající bok	alfadD, alfadC	20,0000    20,0000
3.2 Koeficient ovlivnění mezního úhlu záběru	falfalim	0,0000    = 0,0000 <input checked="" type="checkbox"/>
3.3 Střední normální úhel záběru	alfan	20,0000
3.4 <b>Výběr typu vstupních dat (I nebo II)</b>	Datový typ I (evropské normy) <input type="checkbox"/>	
3.5 Jednotkové posunutí	xhm1	0,3185    0,3185 [~]
3.6 Součinitel výšky hlavy zubu	khap	1,0000    1,0000 [~]
3.7 Součinitel výšky paty zubu	khfp	1,2500    1,2500 [~]
3.8 Jednotková změna tloušťky zubu (teoretická)	xsmn	0,0307    0,0307 [~]
3.9 Střední součinitel výšky hlavy zubu kola	cham	0,3078    0,3408 [~]
3.10 Koeficient hloubky	kd	2,0000    2,0000 [~]
3.11 Jednotková hlavová vůle	kc	0,1250    0,1250 [~]
3.12 Koeficient obvodové tloušťky	kt	0,0682    0,0614 [~]



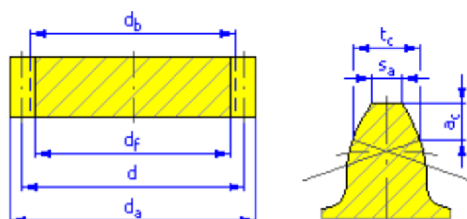
Kapitola výsledků		Metoda 0	
<b>4.0</b> <input checked="" type="checkbox"/> Pro všechna nehypoidní soukolí (a=0)		<==	
4.1 Vnější roztečný průměr (kolo)	de2	113,304	> 83,13
4.2 Šířka ozubení (kolo)	b1	15,000	< 19,2
4.3 Základní úhel sklonu zubů	betam2	0,000	= 0
4.4 Boční vůle (vnější, normální)	jen2	0,0300	> 0,05 (0,05)
4.5 Poloměr frézy	rc0	8,0000	< 18,9...472,1>
1. Standardní, (SumThetafs=5,079 ,Thetaa2=1,893 ,Thetaf2=3,186)			
4.6 Tvar výškového profilu zubu (úhel hlavy a paty zubu)	Thetaa2	1,8934	= 1,8934 <input checked="" type="checkbox"/>
4.7 Úhel hlavy zubu	Thetaf2	3,1860	= 3,186
4.8 Úhel paty zubu			
<b>Určení parametrů roztečného kužele</b>			
4.9 Úhel roztečného kužele	delta1,2	27,4744	62,5256
4.10 Délka povrchy roztečného kužele (vnější)	Re1,2	63,8536	63,8536
4.11 Délka povrchy roztečného kužele (střední)	Rm1,2	56,3536	56,3536
4.12 Délka povrchy roztečného kužele (vnitřní)	Ri1,2	48,8536	48,8536
4.13 Základní úhel sklonu zubů	betam1,2	0,0000	0,0000
4.14 Šířka ozubení	b1,2	15,0000	15,0000
4.15 Koefficient šířky ozubení	cbe2	0,5000	
<b>Určení základních údajů</b>			
4.16 Vnější roztečný průměr	de1,2	58,9181	113,3040
4.17 Střední roztečný průměr	dm1,2	51,9978	99,9957
4.18 Vnitřní roztečný průměr	di1,2	45,0775	86,6875
4.19 Úhlová odchylka hřídél od 90°	DeltaSigma	0,0000	
4.20 Úhel přesazení v axiální rovině pastorku	zetam	0,0000	
4.21 Úhel přesazení v rovině stoupání	zetamp	0,0000	
4.22 Přesazení v rovině sklonu	ap	0,0000	
4.23 Normální modul (střední)	mmn	1,9999	2,0000 <
4.24 Tečný modul (vnější)	met2	2,2661	1,6300 <
4.25 Limitní úhel záběru	alfa_lim	0,0000	
4.26 Generovaný normální úhel záběru zabírající bok / nezabírající bok	alfanD, alfanC	20,0000	20,0000
4.27 Účinná strana úhlu záběru zabírající bok / nezabírající bok	alfaeD, alfaeC	20,0000	20,0000
4.28 Šířka pastorku / kola od bodu výpočtu k vnějšímu bodu	be1,2	7,5000	7,5000
4.29 Šířka pastorku / kola od bodu výpočtu k vnitřnímu bodu	bi1,2	7,5000	7,5000
4.30 Vzdálenost hrany vnitřního kužele k průsečičku os	tzm1,2	49,9979	25,9989
4.31 Vzdálenost vrcholu kužele (roztečného) k průsečičku os	tz1,2	0,0000	0,0000
4.32 Pracovní výška (střední)	hmw	3,9998	
4.33 Výška hlavy zubu (střední)	ham1,2	2,6369	1,3629

4.34	Výška paty zubu (střední)	hfm1,2	1,8629	3,1368
4.35	Hlavová vůle	c	0,5000	0,2500
4.36	Výška zubu (střední)	hm	4,4998	
4.37	Úhel hlavového kužele	deltaa1,2	30,6604	64,4189
4.38	Úhel patního kužele	deltaf1,2	25,5811	59,3396
4.39	Pomocný úhel pro výpočet úhlu přesazení v základní a tečné rovině	fiR, fio	0,0000	0,0000
4.40	Úhel přesazení pastorku pro patní / hlavovou rovinu	zetaR, zetao	0,0000	0,0000
4.41	Úhel hlavy zubu	Thetaa1,2	3,1860	1,8934
4.42	Úhel paty zubu	Thetaf1,2	1,8934	3,1860
4.43	Vzdálenost vrcholu kužele (patního) k průsečičku os	tzR1,2	-0,0006	0,0000
4.44	Vzdálenost vrcholu kužele (hlavového) k průsečičku os	tzF1,2	-0,9804	-0,5540
4.45	Šířka ozubení v roztečné rovině	bp1	15,0000	
4.46	Šířka ozubení pastorku z výpočtového bodu do čelní hrany	b1A	7,5000	
4.47	Délka roztečného kužele kola od vnějšího hraničního bodu pastorku (> Re)	Re21	63,8536	
4.48	Délka roztečného kužele kola od vnitřního hraničního bodu pastorku (< Ri2)	Ri21	48,8536	
<b>Čelní frézování:</b>				
4.49	Úhel sklonu zubů kola na vnějším / vnitřním hraničním bodě	betae21, betai21	0,0000	0,0000
4.50	Úhel sklonu zubů kola vnější / vnitřní	betae2, betai2	0,0000	0,0000
<b>Odvalovací a čelní frézování:</b>				
4.51	Úhel přesazení pastorku v rovině stoupání na vnějším / vnitřním hraničním bodě	zetaep21, zetaip21	0,0000	0,0000
4.52	Úhel sklonu zubů pastorku vnější / vnitřní	betae1, betai1	0,0000	0,0000
<b>Určení výšky zubu</b>				
4.53	Výška hlavy zubu (vnější)	hae1,2	3,0543	1,6109
4.54	Výška paty zubu (vnější)	hfe1,2	2,1108	3,5543
4.55	Výška zubu (vnější)	he1,2	5,1652	5,1652
4.56	Výška hlavy zubu (vnitřní)	hai1,2	2,2194	1,1150
4.57	Výška paty zubu (vnitřní)	hfi1,2	1,6150	2,7194
4.58	Výška zubu (vnitřní)	hi1,2	3,8344	3,8344
<b>Určení tloušťky zubu</b>				
4.59	Střední normální úhel záběru	alfan	20	
4.60	Jednotková změna tloušťky zubu	xsm1,2	0,0272	-0,0342
4.61	Tloušťka zubu na roztečné kružnici	smn1,2	3,7138	2,5409
4.62	Tloušťka zubu na roztečné kružnici (tečná)	smt1,2	3,7138	2,5409
4.63	Průměr roztečné kružnice	dmm1,2	58,6078	216,7447
4.64	Tloušťka zubu na tečné kružnici	smnc1,2	3,7113	2,5408
4.65	Výška zubu na tečné kružnici	hamc1,2	2,6890	1,3664
<b>Určení zbývajících rozměrů kol</b>				
4.66	Hlavový průměr (vnější)	dae1,2	64,3378	114,7904
4.67	Patní průměr (vnější)	dfe1,2	55,1725	110,0244
4.68	Hlavový průměr (vnitřní)	dai1,2	49,0157	87,7163
4.69	Patní průměr (vnitřní)	dfi1,2	42,2118	84,1783
4.70	Vzdálenost hrany vnějšího kužele k průsečičku os	txo1,2	55,2429	28,0299
4.71	Vzdálenost hrany vnitřního kužele k průsečičku os	txi1,2	42,3198	21,5495
4.72	Výška zubu pastorku, kolmá na patní kužel	ht1	5,1618	

Vypočítané hodnoty čelního soukolí programem Autodesk Inventor.

### Společné parametry

Převodový poměr	$i$	1,7241 ul
Požadovaný převodový poměr	$i_{in}$	1,7330 ul
Modul	$m$	2,000 mm
Úhel sklonu	$\beta$	0,0000 deg
Úhel profilu	$\alpha$	20,0000 deg
Vzdálenost os	$a_w$	79,000 mm
Roztečná vzdálenost os	$a$	79,000 mm
Celková jednotková korekce	$\Sigma x$	0,0000 ul
Rozteč zubů	$p$	6,283 mm
Základní rozteč	$p_{tb}$	5,904 mm
Provozní úhel záběru	$\alpha_w$	20,0000 deg
Součinitel trvání záběru	$\varepsilon$	1,7003 ul
Mezní úchylka rovnoběžnosti os	$f_x$	0,0110 mm
Mezní úchylka rovnoběžnosti os	$f_y$	0,0055 mm



### Kola

		Kolo 1	Kolo 2
Typ modelu		Žádný model	Komponenta
Počet zubů	$z$	29 ul	50 ul
Jednotkové posunutí	$x$	0,0000 ul	0,0000 ul
Průměr roztečné kružnice	$d$	58,000 mm	100,000 mm
Průměr hlavové kružnice	$d_a$	62,000 mm	104,000 mm
Průměr patní kružnice	$d_f$	53,000 mm	95,000 mm
Průměr základní kružnice	$d_b$	54,502 mm	93,969 mm
Pracovní roztečný průměr	$d_w$	58,000 mm	100,000 mm
Šířka ozubení	$b$	12,000 mm	14,000 mm
Šířkový poměr	$b_f$	0,2069 ul	0,1200 ul
Výška hlavy zuby	$a^*$	1,0000 ul	1,0000 ul
Hlavová vůle	$c^*$	0,2500 ul	0,2500 ul
Zaoblení paty	$r_f^*$	0,3500 ul	0,3500 ul
Tloušťka zuby	$s$	3,142 mm	3,142 mm
Čelní tloušťka zuby	$s_t$	3,142 mm	3,142 mm
Tloušťka zuby na tětivě	$t_c$	2,774 mm	2,774 mm
Výška hlavy zuby nad tětivou	$a_c$	1,495 mm	1,495 mm
Rozměr přes zuby	$W$	21,477 mm	33,874 mm
Rozměr přes zuby	$z_w$	4,000 ul	6,000 ul
Rozměr přes válečky (kuličky)	$M$	62,885 mm	104,969 mm
Průměr válečku (kuličky)	$d_M$	3,500 mm	3,500 mm
Mezní úchylka sklonu zuby	$F_\beta$	0,0110 mm	0,0110 mm
Mezní obvodové házení ozubení	$F_r$	0,0210 mm	0,0210 mm
Mezní úchylka čelní rozteče	$f_{pt}$	0,0075 mm	0,0075 mm
Mezní úchylka základní rozteče	$f_{pb}$	0,0070 mm	0,0070 mm
Náhradní počet zubů	$z_v$	29,000 ul	50,000 ul
Virtuální roztečný průměr	$d_n$	58,000 mm	100,000 mm
Virtuální hlavový průměr	$d_{an}$	62,000 mm	104,000 mm
Virtuální průměr základní kružnice	$d_{bn}$	54,502 mm	93,969 mm
Jednotková korekce bez zúžení	$x_z$	0,1778 ul	-0,4628 ul
Jednotková korekce bez podříznutí	$x_p$	-0,6765 ul	-1,9047 ul
Jednotkové posunutí s dovol. podříznutím	$x_d$	-0,8464 ul	-2,0747 ul
Snížení hlavy zuby	$k$	0,0000 ul	0,0000 ul
Jednotková šířka hlavy zuby	$s_a$	0,7343 ul	0,7754 ul
Hlavový úhel profilu	$\alpha_a$	28,4699 deg	25,3712 deg



## Vzorový pevnostní výpočet čelního soukolí generátorem komponent.

Generátor komponent – čelní ozubená kola

Návrh Výpočet

Metoda pevnostního výpočtu  
ISO 6336:1996

Zatížení

	Kolo 1	Kolo 2
Výkon	P 0,01kW	0,010 kW
Otáčky	n 100rpm	58,00 rpm
Krouticí moment	T 0,955 N m	1,614 N m
Účinnost	$\eta$ 0,980 ul	

Materiálové hodnoty

Kolo 1  CSN 12050

Kolo 2  CSN 12050

	Kolo 1	Kolo 2
Mez únavy v ohybu	$\sigma_{Flim}$ 410,0 MPa	410,0 MPa
Mez únavy v dotyku	$\sigma_{Hlim}$ 520,0 MPa	520,0 MPa
Modul pružnosti	E 206000 MPa	206000 MPa
Poissonova konstanta	$\mu$ 0,300 ul	0,300 ul
Tepelné zpracování	0 ul	0 ul

Požadovaná životnost  $L_h$  10000 hr

Součinitelé Přesnost

Vypočítat OK Storno <<

Typ výpočtu zatížení

Výkon, otáčky --> moment  
 Moment, otáčky --> výkon  
 Výkon, moment --> otáčky

Typ výpočtu pevnosti  
Kontrolní výpočet

Mezní hodnoty

	Dotyk	Ohyb
Minimální součinitel bezpečnosti	1,200 ul	1,300 ul

**Výsledky**

$F_t$	32,929 N
$F_r$	11,985 N
$F_a$	0,000 N
$F_n$	35,042 N
$v$	0,304 mps
$n_{E1}$	16212,258 rpm
<b>Kolo 1</b>	
$S_H$	1,687 ul
$S_F$	32,521 ul
$S_{Hist}$	4,299 ul
$S_{Fst}$	68,578 ul
<b>Kolo 2</b>	
$S_H$	1,796 ul
$S_F$	39,589 ul
$S_{Hist}$	4,412 ul
$S_{Fst}$	82,919 ul

## Vzorový pevností výpočet čelního soukolí generátorem komponent.

Součinitelé		Dotyk		Ohyb
Součinitelé přidavných zatížení				
Součinitel vnějších dynamických sil	$K_A$	1,200 ul >		
Součinitel vnitřních dynamických sil	$K_{Hv}$	1,013 ul >	1,013 ul >	
Souč. nerovnoměrnosti zatížení po šířce	$K_{H\beta}$	3,007 ul >	2,143 ul > ...	
Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů	$K_{H\alpha}$	1,305 ul >	1,447 ul >	
Součinitel jednorázového přetížení	$K_{AS}$	1,000 ul >		
Součinitelé pro dotyk				
		Kolo 1	Kolo 2	
Součinitel tvaru spoluzabírajících zubů	$Z_H$	2,495 ul >		
Součinitel délky dotyku	$Z_e$	0,876 ul >		
Součinitel jednopárového záběru	$Z_B$	1,026 ul >	1,000 ul >	
Součinitel životnosti	$Z_N$	1,000 ul >	1,037 ul >	
Součinitel maziva	$Z_L$	0,937 ul >		
Součinitel výchozí drsnosti zubů	$Z_R$	1,000 ul >		
Součinitel rychlosti	$Z_v$	0,879 ul >		
Součinitel sklonu zubu	$Z_\beta$	1,000 ul >		
Součinitel velikosti	$Z_X$	1,000 ul >	1,000 ul >	
Součinitel párování materiálu	$Z_W$	1,000 ul >		
Součinitelé pro ohyb				
Součinitel tvaru zubu	$Y_{Fa}$	2,562 ul >	2,342 ul >	
Součinitel koncentrace napětí	$Y_{Sa}$	1,632 ul >	1,724 ul >	
Součinitel přidavného vrubu v patě zubu	$Y_{Sag}$	1,000 ul >	1,000 ul >	
Součinitel sklonu zubu	$Y_\beta$	1,000 ul >		
Součinitel délky dotyku	$Y_e$	0,691 ul >		
Součinitel střídavého zatížení	$Y_A$	1,000 ul >	1,000 ul >	
Součinitel technologie výroby	$Y_T$	1,000 ul >	1,000 ul >	
Součinitel životnosti	$Y_N$	1,000 ul >	1,000 ul >	
Součinitel vrubové citlivosti	$Y_\delta$	1,186 ul >	1,194 ul >	
Součinitel velikosti	$Y_X$	1,000 ul >	1,000 ul >	
Součinitel drsnosti povrchu	$Y_R$	1,000 ul >		
<input type="checkbox"/> Vlastní hodnoty součinitelů				
			OK	Storno

Výsledky	
$Z_E$	189,812 ul
<b>Kolo 1</b>	
$S_H$	1,687 ul
$S_F$	32,521 ul
$S_{Hst}$	4,299 ul
$S_{Fst}$	68,578 ul
<b>Kolo 2</b>	
$S_H$	1,796 ul
$S_F$	39,589 ul
$S_{Hst}$	4,412 ul
$S_{Fst}$	82,919 ul

## Vzorový pevností výpočet čelního soukolí generátorem komponent.

Generátor komponent – čelní ozubená kola

Návrh Výpočet

Společné

Scénář návrhu: Vzdálenost os

Úhel profilu: 20,000 deg

Úhel sklonu: 0,000 deg

Požadovaný převodový poměr: 1,7333 ul

Modul: 2 mm

Vzdálenost os: 79,000 mm

Scénář jednotkového posunutí: Vlastní

Celková jednotková korekce: 0 ul

Náhled...

Kolo1

Žádný model

Počet zubů: 29 ul

Šířka ozubení: 12,000 mm

Jednotkové posunutí: 0,0000 ul

Válcová plocha

Počáteční rovina

Kolo2

Komponenta

Počet zubů: 50 ul

Šířka ozubení: 14,000 mm

Jednotkové posunutí: 0,0000 ul

Válcová plocha

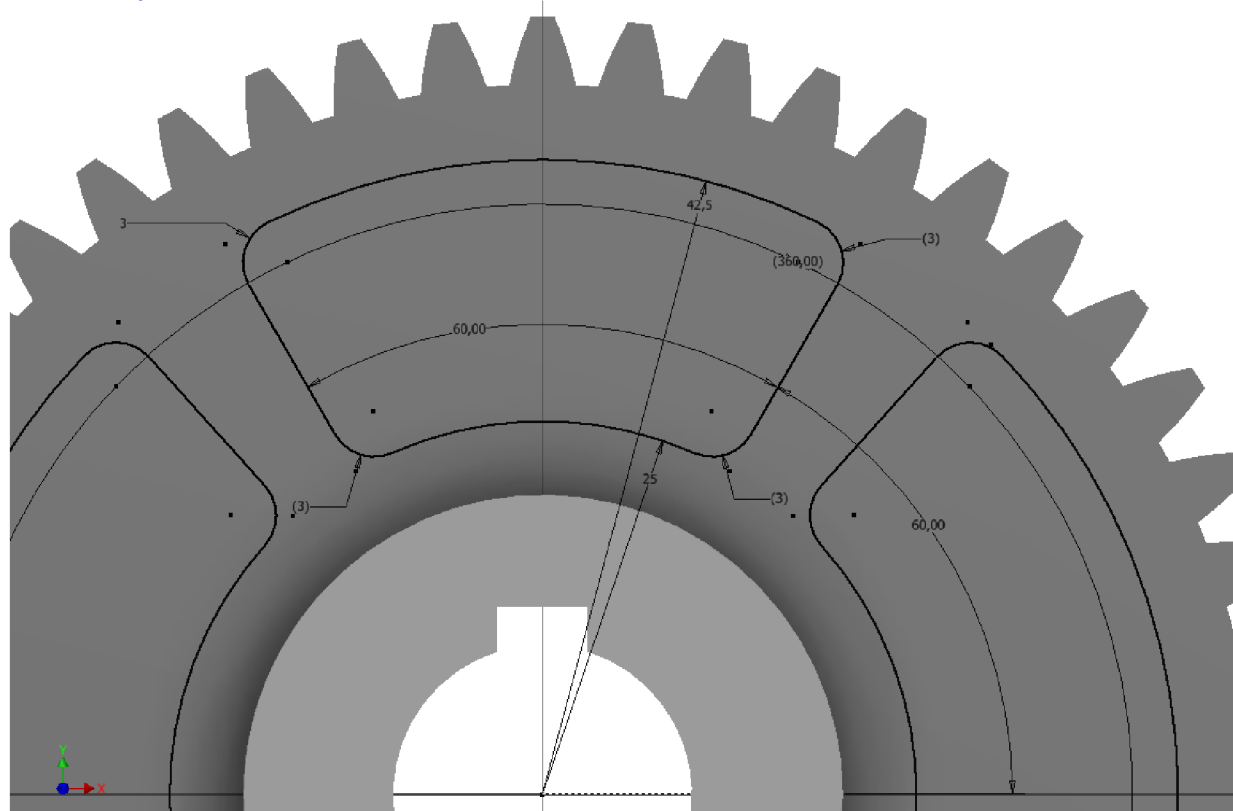
Počáteční rovina

11:08:48 Návrh: Kolo 1: Jednotkové posunutí (x) je menší než Jednotková korekce bez zúžení (x<sub>c</sub>)

11:08:48 Výpočet: Výpočet skončil úspěšně!

Vypočítat OK Storno >>

Parametry odlehčení čelního ozubeného kola hnaného.



Postup zkonstruování kuželového soukolí.

MITCalc

- 9.19 Generování podkladů pro 3D modely
- 9.20 Generovat / Smysl stoupání zubů (pastorek)
- 9.21 Předpona jména ukládaných souborů / Uložení poznámek
- 9.22 Natočení / zrcadlení profilu kola v souřadném systému
- 9.23 Poloměr zaoblení paty zubu rf (pastorek / kolo) [mod.]
- 9.24 Koefficient prodloužení dráhy profilů
- 9.25 Počet bodů boku zubu
- 9.26 Přidat nadstavbu profilu
- 9.27 Počet bodů zaoblení úhlu nadstavby
- 9.28 Uzavřít generovaný profil
- 9.29 Výstup generovaných křivek do formátu
- 9.30 Označení bodů na křivce zubu (pouze dxf)
- 9.31 Generování řezu číslo
- 9.32 Generovat dráhu profilu číslo

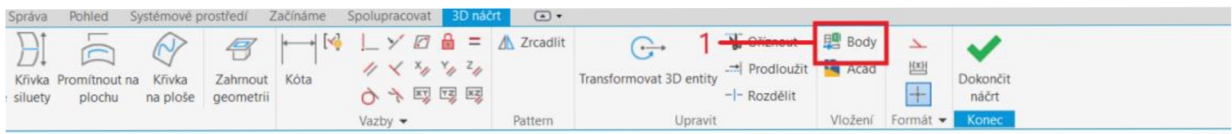
Zvolení kola, které má být vykresleno

Základní náčrt ozubeného kola bez zubů

Pastorek	A. Levý	
01	Ne (Poznámky)	
270 [°]	Ne (Zrcadlit)	
A.	0,2500	0,2500
B.	1,10	
C.	20	
D.	Ano	
E.	5	
F.	Ne	
	XLSX (XLS)	
	Ne	
	Všechny	
1	= < 66 max.	

Neuzavírat profil, pokud je profil uzavřen nelze jej vybrat k šablonování

Profil zubové mezery



2 - File list

3 - Možnosti... button

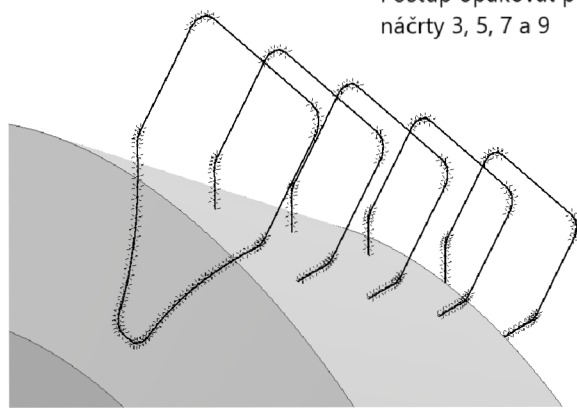
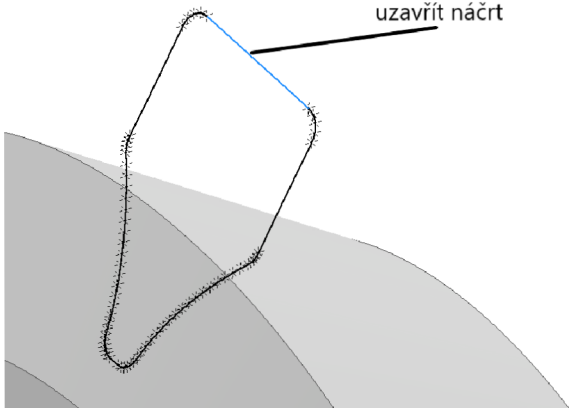
4 - Vyvořit spline option

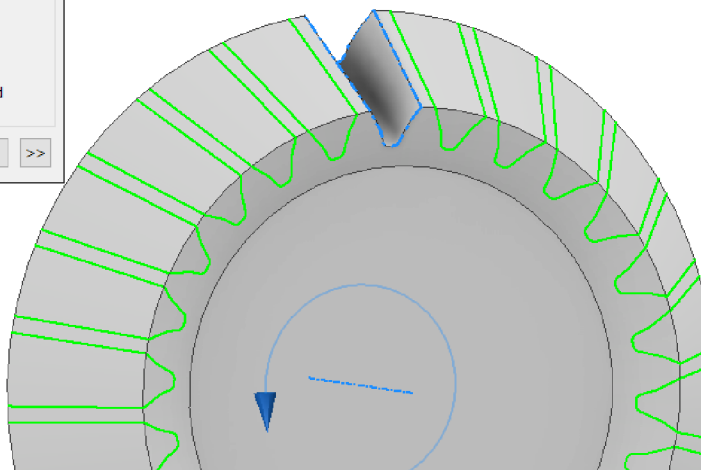
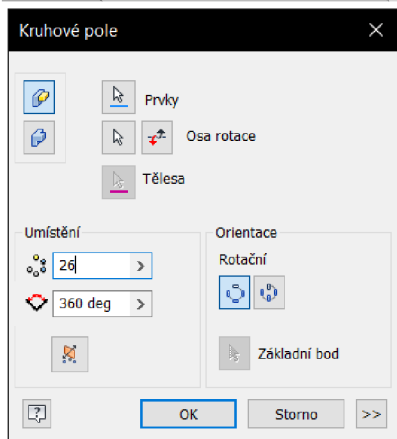
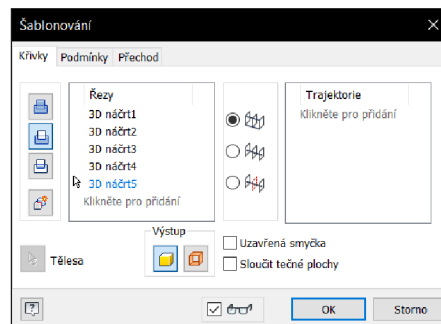
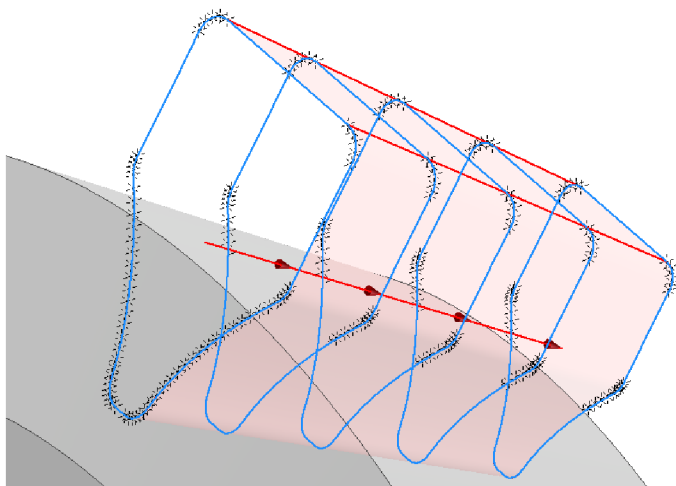
5 - OK button

6 - Otevřít button

Následně je potřeba uzavřít náčrt

Postup opakovat pro náčrtý 3, 5, 7 a 9





## Obecné pevnostní vlastnosti PLA a PET-G filamentů [53].

	<b>PLA</b>	<b>ABS</b>	<b>PET-G</b>
Teplota trysky	180 - 230 °C	210 - 250 °C	220 - 260 °C
Teplota podložky	20 - 60 °C	80 - 110 °C	60 - 90 °C
Tisková podložka	Nepovinná	Povinná	Doporučuje se
Komora při tisku	Nepovinná	Doporučuje se	Nepovinná
Přilnutí první vrstvy	Dobré	Drobné problémy	Drobné problémy
Výpary	Skoro žádné	Silné	Silné
Absorbce vlhkosti	Ano	Ano	Ano
Youngův modul (GPa)	3,5	2,4	2,2
Modul pružnosti (GPa)	4	2,2	1,9
Pevnost v ohybu (MPa)	80	65	64
Poměr pevnosti k hmotnosti (kN*m/kg)	40	31-80	42
Pevnost v tahu (MPa)	110	37-110	53
Odolnost proti nárazu (J/m)	-	70-370	77
Tvrdost Rockwell R	-	94	108
Teplota skelného přechodu (°C)	60	105	81
Deformace při teplotě (°C)	65	100	70
Teplota tání (°C)	160	-	140
Tepelná kapacita (J/kg*K)	1800	1470	1200
Tepelná vodivost (W/m*K)	0,13	0,17	0,29
Tepelná difuzivita (m <sup>2</sup> /s)	0,058	0,12	0,19

