



**FAKULTA
ŠTOJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Úprava reálné převodovky pro možnosti
testování polymerových kol**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2023

Jan ŠEBEK

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD ŠTOJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Karel PETR, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šebek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **501221**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Úprava reálné převodovky pro možnosti testování polymerových kol

Název bakalářské práce anglicky:

Modifying a Real Gearbox for Polymer Gear Testing Capabilities

Pokyny pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je úprava reálné převodovky pro možnosti testování polymerových kol. Student vytvoří 3D CAD model převodovky dle reálného kusu a provede výpočet parametrů této převodovkou. Dále student navrhne sadu 3D tištěných polymerových kol z různých materiálů a s různými parametry tisku. Navržená kola mezi sebou porovná. Pro takto navržená kola dále student definuje parametry pro testování, případně také metodiku testování. Součástí práce bude výkresová dokumentace upravovaných dílů. Vybrané výkresy budou tištěné pro možnosti diskuze během obhajoby.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Spojce a části spojovací. Praha: ČVUT, 2008.
- [2] Joseph E. Shigley: Konstruování strojních součástí. 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] FREDERICK E. GIESECKE. Technical Drawing with Engineering Graphics. 2014. Pearson New International Edition. ISBN 13: 9781292026183.
- [4] Petr, K. STROJÍRENSKÉ KONSTRUOVÁNÍ – Tvorba výkresové dokumentace dle ISO norem. Praha: ČVUT v Praze (skripta), 08/2020. ISBN 978-80-01-06715-4.
- [5] Katalogy výrobců.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Karel Petr, Ph.D. ústav konstruování a částí strojů FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **11.04.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Karel Petr, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. František Lopot, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Úprava reálné převodovky pro možnosti testování polymerových kol“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karla Petra, PhD., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze _____

Jan Šebek

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlu Petrovi, Ph.D. za ochotu a poskytování odborných rad, připomínek a konzultací při tvorbě mé práce. Dále bych chtěl poděkovat mé sestře Evě, rodině a blízkým za podporu během studia.

Anotační list

Jméno autora:	Jan ŠEBEK
Název BP:	Úprava reálné převodovky pro možnosti testování polymerových kol
Anglický název:	Modifying a Real Gearbox for Polymer Gear Testing Capabilities
Rok:	2023
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Karel PETR, PhD.
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	počet stran: 51 počet obrázků: 27 počet tabulek: 16 počet příloh: 5
Klíčová slova:	ABS, PLA, PETG, nylon, 3D tisk, evolventní ozubení
Keywords:	ABS, PLA, PETG, nylon, 3D printing, involute gears
Anotace:	Tato bakalářská práce obsahuje rešerši možností 3D tisku, materiálů pro 3D tisk a parametrů 3D tisku ovlivňující mechanické vlastnosti. Praktická část obsahuje návrh měřicí trati pro testování 3D tištěného evolventního ozubení a teoretické únosnosti uvažovaných vzorků.
Abstrakt:	This bachelor thesis contains the research of possibilities of 3D printing, materials for 3D printing and parameters that affect mechanical properties of 3D printed parts. The practical part contains the design of a testing track for 3D involute gears and theoretical strength of proposed test samples.

Obsah

1. Úvod	1
2. Aditivní výroba z polymerů.....	2
3. Metody aditivní výroby z polymerů.....	3
3.1. FFF	3
3.2. UV polymerizace	3
3.2.1. SLA.....	4
3.2.2. DLP.....	4
3.2.3. MSLA.....	4
4. Parametry tisku	5
4.1. Výška vrstvy.....	5
4.2. Rozlišení tisku.....	5
4.2.1. FFF	5
4.2.2. UV polymerizace.....	6
4.3. Výplň.....	6
4.3.1. Dvourozměrné výplně	6
4.3.2. Trojrozměrné výplně	7
4.3.3. Srovnání výplní	8
4.4. Teplota trysky a podložky.....	9
5. Materiály pro 3D tisk	10
5.1. FFF	10
5.1.1. ABS	10
5.1.2. PLA.....	11
5.1.3. PETG	11
5.1.4. Nylon	12
5.1.5. Ostatní materiály.....	13
5.1.6. Shrnutí a porovnání materiálů	13
5.2. UV polymerizace	13
6. Shrnutí možností 3D tisku a důležité parametry pro polymerová ozubená soukolí	13
7. Ozubená kola	14
8. Návrh měření.....	15
8.1. Statické testování	15
8.2. Dynamické testování.....	19
8.3. Konfigurace dynamických testů	19
8.3.1. Plastové ozubené kolo s ocelovým pastorkem	19
8.3.2. Celoplastové soukolí.....	22
8.4. Průběh měření.....	23
8.4.1. Statický test	23
8.4.2. Dynamický test.....	24
9. Návrh, výpočty a kontrola polymerového ozubení	24
9.1. Pevnostní kontrola ozubení dle VDI 2736	24
9.2. Síly v ozubení.....	26
10. Návrh testovaného kola	27

11.	Model převodovky	30
11.1.	První konfigurace testování.....	31
11.2.	Druhá konfigurace testování.....	32
11.3.	Mazání převodovky	33
11.4.	Kontrola únosnosti ložisek	34
12.	Návrh měřícího standu.....	37
13.	Závěr.....	42
	Seznam použitých zkratk a symbolů	43
	Použitá literatura.....	45
	Seznam obrázků	49
	Seznam tabulek.....	50
	Seznam příloh.....	51

1. Úvod

Pro svou bakalářskou práci jsem si vybral úpravu existující převodovky pro testování plastových kol vyrobených metodou 3D tisku. Upravovaná převodovka je jednoduchá jednostupňová převodovka se šikmými čelními ozubenými koly. Soukolí má úhel záběru 20° , modul 1,25mm, úhel stoupání šroubovice 12° a šířku věnce 30mm. Pastorek má 25 zubů a je součástí vstupní hřídele. Ozubené kolo má 100 zubů a je uloženo na výstupní hřídeli s malým přesahem. Výkon je přenášen pomocí těsného pera. Obě hřídele jsou uloženy v kuželíkových ložiskách v konfiguraci do X. Ložiska jsou opřena o osazení na hřídelích a sevřena bočními víky. Celé soukolí je uzavřeno v odlévané skříni s víkem a dělící rovinou v rovině os vstupní a výstupní hřídele. Soukolí je mazáno ponorem a ložiska jsou mazána olejovým filmem. Vstupní a výstupní hřídel jsou zatěsněny hřídelovými těsněními zalisovanými v bočních víkách. Připojovací průměr na vstupní hřídeli je 22mm a připojovací průměr na výstupní hřídeli je 28 mm. Výkon je přiváděn na vstupní hřídel pomocí těsného pera a stejným způsobem je výkon odváděn z výstupní hřídele. Osová výška převodovky je 95mm. Pro připojení převodovky ke konstrukci stroje je k dispozici osm děr pro šroub M16. Fotografie upravované převodovky viz Obrázek 1. Na fotografii je již původní ocelové ozubené kolo nahrazeno obráběným plastovým. Tato konkrétní převodovka byla již v minulosti použita pro jiné testy.



Obrázek 1: Upravovaná převodovka

2. Aditivní výroba z polymerů

Aditivní výroba, nebo 3D tisk, je relativně moderní technologií k výrobě objemových strojních součástí. Na rozdíl od tradičních technologií výroby nedochází při aditivní výrobě k odběru materiálu z polotovaru. Výroba se uskutečňuje postupným nanášením vrstev materiálu nejdříve na podložku, poté na předchozí vrstvy. Tímto způsobem je součást vyrobena řez po řezu. Díky postupnému přibývání materiálu je možné vyrobit tvarově velmi složité součásti, které by byly tradičním způsobem buď velmi těžko vyrobitelné nebo zcela nevyrobitelné. Příkladem jsou vnitřní uzavřené nebo téměř uzavřené dutiny, nebo nerozebíratelné klouby, kdy je kloub vyroben již uvnitř uzavřeného lůžka. [1]

Aditivní výroba se v současnosti uplatňuje při tzv. „rapid prototypingu“ nebo zkráceně RP. RP je způsob vývoje nových produktů, kdy jsou jednotlivé koncepty okamžitě vyráběny, zejména pomocí aditivních technologií, a testovány na prototypu nebo v provozu. Tento přístup je možný díky prakticky nulovým požadavkům aditivních technologií na přípravky nebo nástroje a také díky nízké výrobní ceně součástí vyrobených aditivními technologiemi. Kombinace těchto vlastností v podstatě znamená, že cokoliv konstruktér vymodeluje, může být v řádu dnů vyrobeno. Je nutné zdůraznit že možnosti RP jsou omezeny na tvarovou

funkčnost. RP nemůže být využit na testování funkčních vlastností navrhované součásti, protože aditivně nanesený materiál se mechanickými vlastnostmi dramaticky odchyluje od tradičně zpracovaného materiálu. Jediný případ, kdy součásti vyrobené v rámci RP mohou být použity na testování funkčních vlastností, je, když je i finální součást vyrobena aditivními technologiemi. [1]

V sériové výrobě se aditivní technologie používají velmi zřídka kvůli velmi malé produktivitě. Protože se součásti vrství řez po řezu, je výroba extrémně pomalá. Kromě již tak malé rychlosti je výrobní čas silně závislý na velikosti součásti. Součásti vyrobené aditivními technologiemi se v sériové výrobě používají, jen když je součást prakticky nevyrobitelná ostatními metodami. [1]

3. Metody aditivní výroby z polymerů

3.1. FFF

Fused filament fabrication (FFF), častěji známá pod zkratkou FDM (Fused deposition modelling), je v současnosti nejrozšířenější aditivní technologií. Byla vyvinuta společností Stratasys a první produkt využívající tuto technologii byl uveden v roce 1989. FFF spočívá v natavování základního materiálu ve formě struny. Natavený materiál je extrudován z pohyblivé extrudovací hlavy, která opisuje nejprve obrys řezu součásti a poté vyplní vnitřek řezu. Vzhledem k tomu, že extrudovací hlava musí postupně opsat celý obvod a poté ještě vyplnit vnitřek, je tato metoda nejpomalejší. Protože se materiál natavuje, je nutné před nanesením další vrstvy umožnit předchozí vrstvě vychladnout a ztuhnout alespoň natolik, aby spolehlivě unesla další vrstvu. [1] [2]

3.2. UV polymerizace

Je soubor metod, které využívají tekutý základní materiál. Hlavní vlastností základního materiálu je schopnost polymerizovat působením UV záření. Tiskárna je vybavena nádobou na základní materiál, do které je ponořena podkladová deska. Zdroj UV záření postupně polymerizuje jednotlivé vrstvy. Protože se celý řez vyrábí buď najednou, nebo ve velmi krátkém časovém úseku, je tato metoda produktivnější než FFF. Nevýhodou je obtížnější manipulace se základním materiálem. [1] [3]

Rozlišujeme dvě konfigurace tiskárny. První je tzv. Top-down, kdy je zdroj UV záření nad nádobou se základním materiálem a podkladová deska se postupně ponořuje hlouběji do nádoby. Na konci tisku je hotová součást kompletně ponořena v základním materiálu.

Tato konfigurace je typická pro průmyslové velkoformátové tiskárny. Druhá konfigurace je tzv. bottom-up. Zde je zdroj umístěn na dně nádoby a podkladová deska postupně vyjíždí z nádoby ven. Na konci tisku je hotová součást zcela vynořena z nádoby ven. Tuto konfiguraci využívají tiskárny pro domácí použití. [3]

V současnosti se používají tři hlavní metody expozice UV záření. SLA, DLP a LCD. [3]

3.2.1. SLA

Stereolitografie (SLA) známá také jako foto-polymerizace je nejstarší aditivní technologií. Byla vyvinuta v 80. letech 19. století Charlesem Hullem a později vyráběna jeho firmou 3D systems. Jako zdroj UV záření se používá laser. Laser postupně polymerizuje základní materiál. Přestože laserový paprsek musí součást opsat stejně jako FFF, může to udělat významně rychleji než extrudovací hlava. [3]

3.2.2. DLP

Digital light processing (DLP) je technologie využívající UV projektor. Projektor promítá na průhledné dno vany řez součásti, přičemž osvětlené oblasti polymerizují. Protože se celý řez promítá z jednoho bodu, může docházet k deformaci obrazu na okrajích tiskové oblasti. [4]

3.2.3. MSLA

Masked stereolithography (maskovaná stereolitografie nebo MSLA) je v současnosti nejrozšířenější ze skupiny vanových polymerizačních technologií. Pro polymerizaci je použito pole UV diod, které je odstiňováno pomocí LCD. Na LCD se zobrazí celý řez najednou tak, že oblasti určené k polymerizaci zůstanou průhledné a zbytek se zneprůhlední. LCD je nejlevnější metodou vanových polymerizačních technologií, ale také nejméně přesnou. Malá přesnost je způsobena rozptylem světla na rozhraních průhledných a neprůhledných oblastí. [4]

4. Parametry tisku

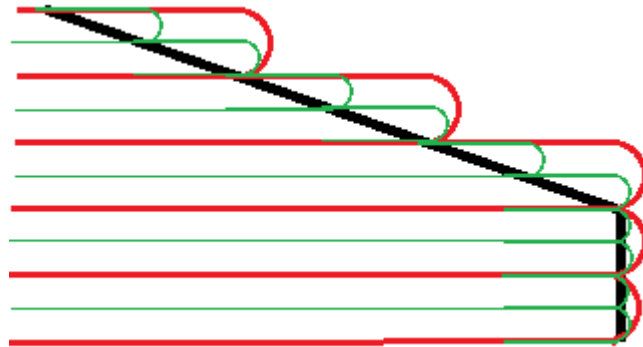
4.1. Výška vrstvy

Výška vrstvy odpovídá kroku v ose Z. Také je jí určena kvalita tisku, obzvláště na částech součásti, které svírají malý úhel s vodorovnou rovinou. Při velkých výškách vrstvy dochází k tzv. „staircase efektu,“

(Obrázek 2) který lze pozorovat např. při tištění kulových povrchů.

Rovnicková oblast koule je vytištěna kvalitně, ale na vrchlíku jsou jasně vidět soustředné kruhy. Může se zdát, že je žádoucí tisknout

s nejmenší výškou vrstvy, kterou tiskárna umožňuje, avšak s klesající



Obrázek 2: Staircase efekt (skutečný tvar – černě, velká výška vrstvy – červeně, malá výška vrstvy – zeleně)

výškou vrstvy roste délka tisku. Typické tloušťky vrstvy pro FFF jsou $0,1 \div 0,4$ mm, pro UV polymerizaci $0,025 \div 0,1$ mm. Součást je pro potřeby tisku rozřezána na jednotlivé řezy, kde tloušťka řezu odpovídá výšce vrstvy. Při snížení výšky vrstvy z 0,4 mm na 0,2 mm je součást rozřezána na dvakrát více řezů a tisk trvá dvakrát déle. Výška vrstvy také významně ovlivňuje soudržnost jednotlivých vrstev. To je způsobeno částečně podobou vrstvy při vyšších tloušťkách (Obrázek 3), kdy při menších tloušťkách je méně prázdného prostoru mezi jednotlivými vrstvami a částečně lepším vývojem teplot v tenčích vrstvách. Pro standardní trysku je ideální výška 0,15 až 0,2 mm. V tomto rozmezí se přestává zvyšovat soudržnost vrstev se zmenšující se tloušťkou vrstvy a zároveň je tisk dostatečně rychlý. [5] [6] [7]

4.2. Rozlišení tisku

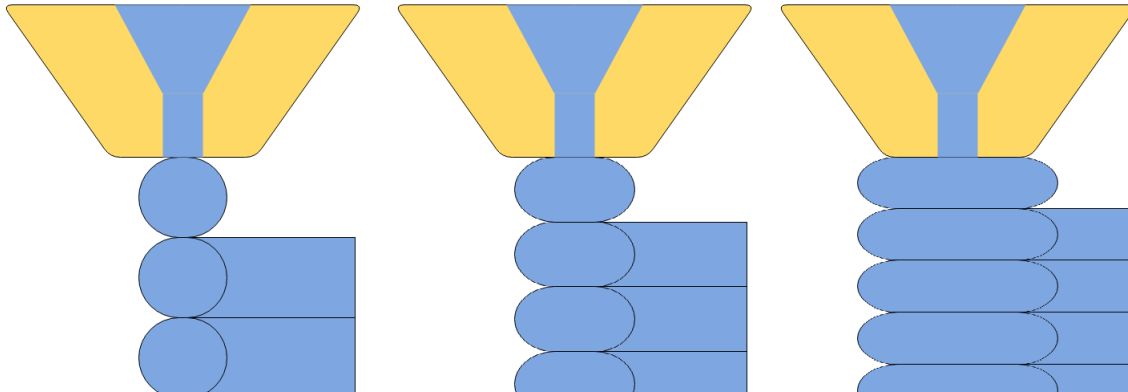
Rozlišení tisku je určeno různě u různých metod tisku.

4.2.1. FFF

U metody FFF je rozlišení určeno průměrem trysky. Průměr trysky určuje horní limity mnoha parametrů. Přímo ovlivňuje velikost nejmenšího prvku součásti. Obecně přijímaná závislost mezi průměrem trysky a nejmenším prvkem je $d \geq 2 * d_t$, kde d je charakteristický rozměr prvku a d_t je průměr trysky. [7]

Průměr trysky určuje také maximální výšku vrstvy. Doporučuje se, aby výška vrstvy nebyla větší než 80 % průměru trysky. Když se výška vrstvy blíží průměru trysky, vrstva se stává kruhovitou a dochází ke vzniku mezer v materiálu a snižuje se přilnavost vrstev k sobě.

[7]



Obrázek 3: Tvar vrstvy v závislosti na výšce vrstvy (příliš velká výška vrstvy – vlevo, ideální výška vrstvy – uprostřed, minimální výška vrstvy – vpravo) [8]

4.2.2. UV polymerizace

U metod využívajících UV polymerizaci je rozlišení tisku určeno rozlišením zdroje UV světla. Rozlišení zdroje nemá vliv na výšku vrstvy, ale velikost nejmenšího detailu je omezena podobně jako u FFF metody.

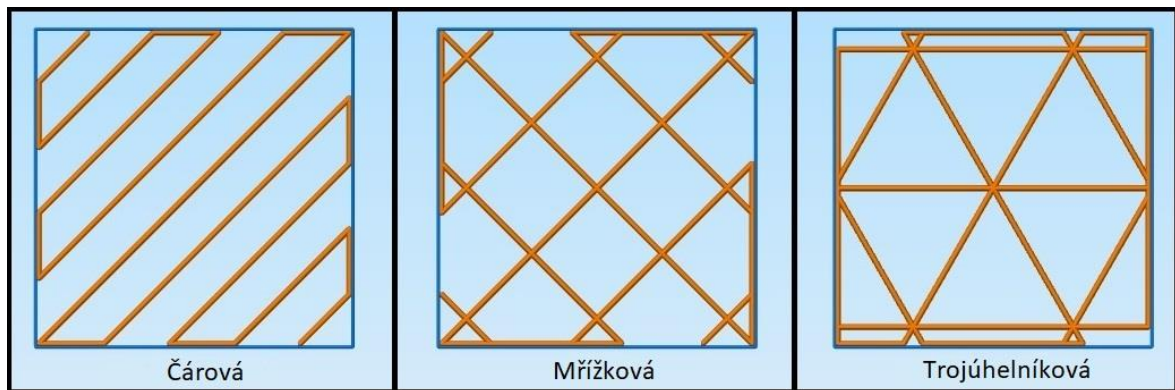
4.3. Výplň

Součásti nejsou zpravidla tištěny se 100 % výplní vnitřních prostor. Zvyšování podílu výplně dramaticky prodlužuje tiskový čas. Pro běžné aplikace se volí podíl vyplnění 15÷50 %. Hustota výplně vzácně přesahuje 80 %. Při vyšší hustotě je součást prakticky vyplněna, ale vlivem tvaru výplně je velmi pórovitá, což ve výsledku neguje vyšší hustotu výplně.

Důležitým parametrem výplně je tvar výplně, který ovlivňuje jak pevnost součásti, tak délku tisku a spotřebu materiálu. V současnosti rozlišujeme až 16 tvarů výplně. Nabídka se liší podle výrobců, ale v praxi se používá pět hlavních tvarů, které lze rozdělit do dvou skupin na dvourozměrné a trojrozměrné [9]

4.3.1. Dvourozměrné výplně

Jak název napovídá, dvou-rozměrné výplně se realizují pouze v jedné vrstvě, a proto poskytují pevnost hlavně v rovině XY [9] [10] [11]



Obrázek 4: Typy dvourozměrných výplní [12]

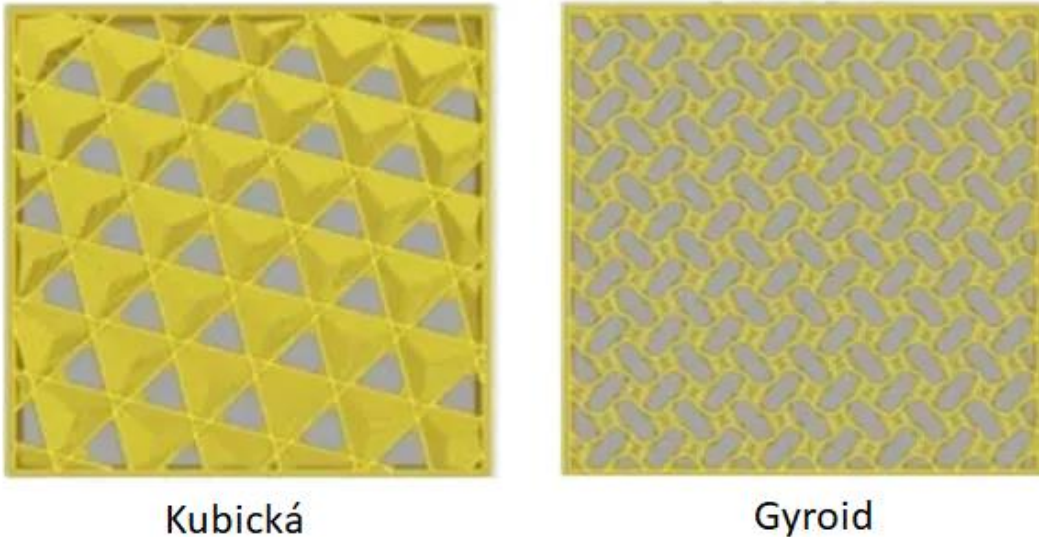
Nejjednodušším typem výplně je tzv. čárová výplň (Obrázek 4). Funguje v podstatě na principu šrafování, přičemž šrafy v následující vrstvě jsou o 90° pootočený. Kvůli střídání směru šrafování je výplň po většinu času tisknuta „do vzduchu,“ což způsobuje velmi malou pevnost výplně. Hlavní výhodou čárové výplně je rychlost tisku, jinak nenabízí žádné zajímavé vlastnosti. [9] [10] [11]

Pokročilejší a mírně kvalitnější je mřížková výplň (Obrázek 4). Na rozdíl od čárové výplně, kde se směry střídají po vrstvě, mřížka šrafuje každou vrstvu jak ve směru osy X, tak ve směru osy Y. Součástí je ve výsledku vyplněna pravidelnými čtyřbokými hranoly. Oproti čárové výplni je pevnější a časově náročnější. [9] [10] [11]

Nejkvalitnější dvourozměrnou výplní je trojúhelníková výplň (Obrázek 4). Řez součástí je vyplněn sítí rovnoramenných trojúhelníků, která zajišťuje relativně izotropní pevnost vrstvy. Protože je to ale jen dvourozměrná výplň, je součástí ve finále vyplněna pravidelnými trojbokými hranoly. Je časově nejnáročnější a má největší spotřebu materiálu, ale je také nejpevnější. [9] [10] [11]

4.3.2. Trojrozměrné výplně

Tvary spadající do této skupiny vyplňují objem více či méně složitými prostorovými plochami. Přestože jsou tyto plochy stále rozděleny do řezů, jako samotná součást, jejich geometrie zajišťuje pevnost jak v rovině řezu, tak i částečně kolmo na něj. Z těchto důvodů se trojrozměrné výplně používají pro funkční součásti. [9]



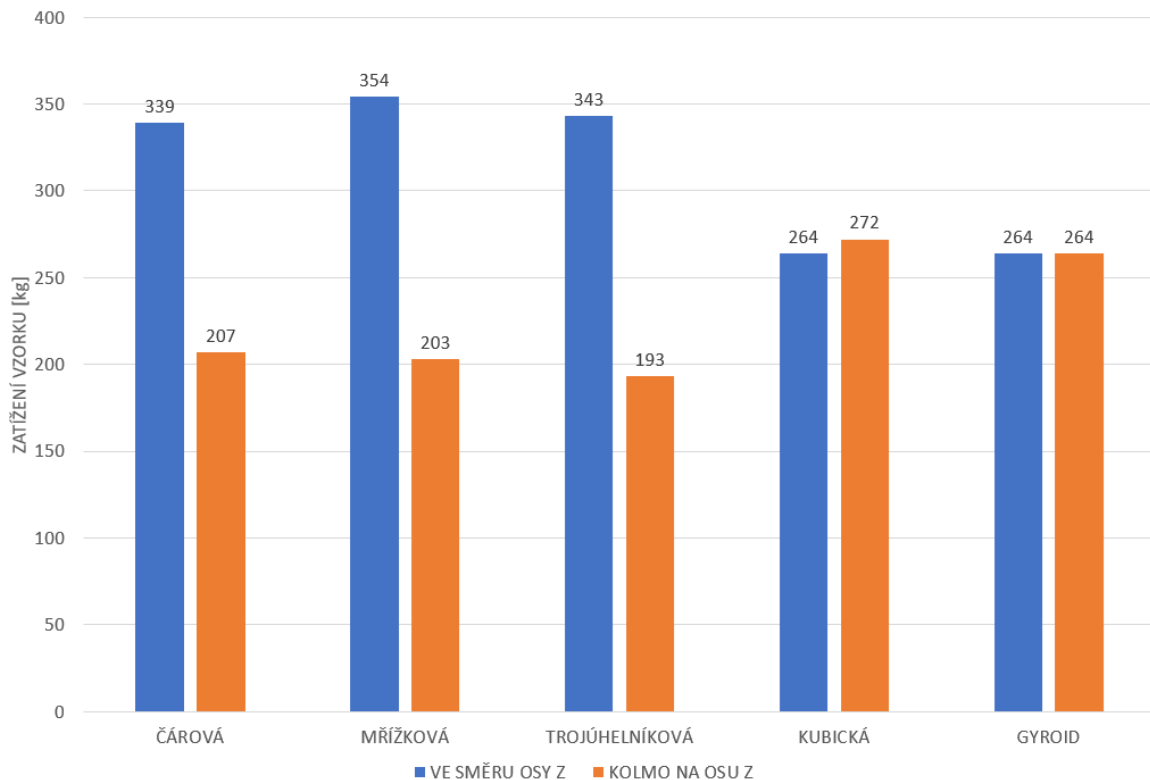
Obrázek 5: Typy trojrozměrných výplní [13]

Nejjednodušší trojrozměrnou výplní je kubická výplň (Obrázek 5). Kubická výplň vyplňuje součást krychlemi. Aby bylo dosaženo co nejlepší pevnosti vrstev, jsou krychle orientovány tak, aby dvě tělesové úhlopříčky ležely v rovině XY a třetí byla rovnoběžná s osou Z. [9] [10] [11]

Nejsložitější a také nejpevnější výplní z běžně používaných výplní je tzv. „gyroidní výplň“ (Obrázek 5). Součást je vyplněna vlnitými čarami, které se střídavě spojují a rozpojují a v rámci několika vrstev mění orientaci o 90°. Díky tvarové složitosti se pod zátěží chová téměř izotropně a svou pevností předčí ostatní výplně. Navíc jejich struktura umožňuje použít nižší podíl výplně při zachování pevnosti. Nevýhodou je složitě generování výplně a složitost a pravidelnost křivek v řezu, což může způsobit rozkmitání tiskárny a zhoršení kvality tisku. [14] [15]

4.3.3. Srovnání výplní

Z testů vzorků s různými výplněmi (Obrázek 6) je zřejmé, že neexistuje jediná nejlepší výplň. V případě jednoduché napjatosti, kdy je navíc znám směr zatěžování, jsou dvourozměrné výplně jednoznačně výhodnější a záleží pouze na tom, zda je nutná mírná izotropie trojúhelníkové výplně, nebo si aplikace vystačí s nejjednoduššími výplněmi. Pokud je součást ve stavu složitější napjatosti, směr zatěžování není předem znám nebo je proměnný, pak je vhodnější zvolit trojrozměrnou výplň.



Obrázek 6: Srovnání výplní (data z [16], upraveno)

4.4. Teplota trysky a podložky

Teplota trysky a podložky se uplatňuje pouze u FFF metody, neboť polymerizace probíhá za pokojových teplot.

Ačkoliv teplota trysky ani podložky není parametrem hotové součásti, významně ovlivňuje její vlastnosti a v krajních případech i vyrobiteľnost. Na rozdíl od ostatních parametrů tisku, je jak teplota trysky, tak teplota podložky závislá na zvoleném materiálu. Z podstaty FFF technologie je možné použít pouze termoplasty, a proto je minimální teplota trysky omezena teplotou skelného přechodu plastu. Pro samotný tisk se volí teploty výrazně vyšší, za prvé pro dostatečné snížení viskozity, usnadnění extruze a zamezení ucpání trysky, a za druhé, protože teplota nataveného plastu má přímý vliv na soudržnost vrstev. Shora je teplota trysky omezena teplotou rozkladu plastu, ale v praxi spíše teplotou, při které stihne vrstva dostatečně vychladnout před nanesením další vrstvy. Teplotu trysky je také nutné snížit, když výroba součásti vyžaduje přemostění mezer tzv. „bridging“, protože plastové vlákno musí tuhnut v prostoru dostatečně rychle, aby nedošlo k prověšení.

Teplota podložky neovlivňuje výsledné vlastnosti součásti tolik, jako teplota trysky. Její význam spočívá ve vyrobiteľnosti. Střídavé nerovnoměrné ohřívání a ochlazování částí

součásti vnáší do součásti značná napětí. Nejkritičtější fáze výroby je několik prvních vrstev, kdy je součást velmi tenká, a proto málo tuhá a rychle se prohřívá i chladne. Protože se uchycení součásti realizuje pouze adhezí první platové vrstvy na podložku, hrozí při častém prodlužování a smršťování součásti nebezpečí částečného nebo úplného odlepení součásti od podložky. Odlepení součásti způsobí v lepším případě deformaci součásti, a pokud dojde k úplnému odlepení, tak i kompletní destrukci tisku, kdy se první vrstvy často nalepí na trysku a tiskárna vyrobí pouze klubko plastových vláken kolem trysky. [17] [18] [19]

5. Materiály pro 3D tisk

Výběr materiálu významně ovlivňuje obtížnost výroby i vlastnosti hotové součásti. Díky rozmachu aditivní výroby zažívají materiály pro 3D tisk rapidní vývoj a v současné době je k dispozici široká škála jak materiálů, tak i barev. Ozubené soukolí je vhodné mazat, jak kvůli odvodu tepla, tak kvůli zmenšení tření na styčných plochách. Proto je důležité kontrolovat chemickou kompatibilitu materiálu kol a zvoleného maziva. [20]

5.1. FFF

Princip této metody vyžaduje využití tavitelných materiálů. Z tohoto důvodu většina používaných materiálů spadá do kategorie termoplastů. Pro vylepšení jejich vlastností mohou být termoplasty dopovány mikročásticemi jiných látek, např. uhlíkovými částicemi. Plasty zpracované běžnými metodami mají mez pevnosti zpravidla výrazně vyšší než stejné plasty zpracované metodou FFF z důvodu velké pórovitosti materiálů tisknutých metodou FFF. Pro návrh a dimenzování jsou velmi důležité únavové vlastnosti zvoleného materiálu. Z podstaty technologie FFF jsou součásti významně vrubované, což nepříznivě ovlivňuje únavové vlastnosti tištěných součástí. Další komplikací pro cyklicky zatěžované součásti vyrobené z 3D tištěných polymerů je, že polymery nevykazují mez únavy, takže každá takto vyrobená cyklicky zatěžovaná součást musí být navržena na časovou mez únavy. [20]

5.1.1. ABS

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je nejdéle používaný materiál pro 3D. V současné době je postupně nahrazován PLA. Je velmi citlivý na teplotu trysky a podložky. Teplota skelného přechodu je okolo 100°C a teplota měknutí je 98°C. Pro tisk ABS se volí teplota trysky 230÷260°C a kvůli vysoké teplotní roztažnosti je nutné podložku vyhřívat na 80÷130°C. Nejlepších výsledků lze dosáhnout vyhříváním celého tiskového prostoru na

60÷70°C. ABS se vyznačuje nejmenší pevností z běžně tisknutelných materiálů. ABS zpracovaný běžnými metodami má mez pevnosti okolo 50 MPa. Mez pevnosti 3D tištěného ABS nepřesahuje 20 MPa. Únavové vlastnosti ABS pro míjivý zatěžovací cyklus a zpracování technologií FFF jsou popsány závislostí

$$\log(\sigma) = 1,613 - 0,179 * \log(N) \quad (1)$$

pro $N > 100$, s časovou mezí únavy $\sigma_A(2\,000\,000) = 3,1 \text{ MPa}$.

Zajímavou vlastností ABS je jeho rozpustnost v acetonu. Této vlastnosti lze využít pro vyhlazení povrchu součásti částečným rozpuštěním povrchové vrstvy. To slouží jak pro zlepšení vzhledu součásti, tak pro mírné zpevnění součásti a zlepšení kluzných vlastností. Organická rozpouštědla rozpouští ABS, proto je mazání omezeno na minerální olej nebo na syntetická maziva. [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27]

5.1.2. PLA

Polylactic acid neboli polymléčná kyselina je v současnosti nejrozšířenější tiskový materiál. Na rozdíl od většiny termoplastů se PLA vyrábí z organických surovin, nejčastěji z kukuřičného škrobu, proto je obzvláště relevantní v dnešní snaze o udržitelnost a ekologičnost. PLA také disponuje mechanickými vlastnostmi srovnatelnými s ostatními materiály a zároveň je méně náročná na výrobní podmínky. PLA je také nejpevnější běžně užívaný materiál s mezí pevnosti v rozmezí 60 až 70 MPa při běžném zpracování a okolo 40 MPa při zpracování metodou FFF. Únavové vlastnosti PLA pro míjivý zatěžovací cyklus a zpracování technologií FFF jsou popsány závislostí

$$\log(\sigma) = 1,637 - 0,135 * \log(N) \quad (2)$$

pro $N > 100$, s časovou mezí únavy $\sigma_A(2\,000\,000) = 6,1 \text{ MPa}$.

Nízká teplota skelného přechodu, která se pohybuje okolo 65°C, umožňuje tisknout s teplotou trysky v rozmezí 190÷220°C, doporučená teplota podložky je 60°C, ale díky malé teplotní roztažnosti lze tisknout bez vyhřívání podložky i tiskového prostoru. S nízkou teplotou skelného přechodu se pojí i nízká teplota měknutí, která zpravidla nepřesahuje 50°C. PLA je obdobně citlivé na organická rozpouštědla jako ABS, ale na rozdíl od něj je odolné vůči běžným motorovým olejům. [28] [29] [30] [25] [31] [32]

5.1.3. PETG

PETG je modifikovaná verze PET. Modifikace probíhá při polymeraci, kdy je k PET přidán glykol. Tato modifikace PET je obzvláště vhodná pro 3D tisk, protože glykol ve

strukturu polymeru snižuje křehkost a zmenšuje riziko přehřátí při tisku. PETG má výbornou odolnost vůči chemikáliím a nízkou teplotní roztažnost. Představuje zajímavou kombinaci vlastností PLA a ABS. PETG má mez pevnosti okolo 55 MPa při konvenčním zpracování a 40 až 44 MPa při zpracování metodou FFF. Únavové vlastnosti PETG pro míjivý zatěžovací cyklus a zpracování technologií FFF jsou popsány závislostí

$$\log(\sigma) = 2,425 - 0,253 * \log(N) \quad (3)$$

pro $N > 100$, s časovou mezí únavy $\sigma_A(2\,000\,000) = 6,8 \text{ MPa}$.

PETG má teplotu skelného přechodu okolo 80°C a teplotu měknutí nepřesahující 73°C. Parametry tisku jsou prakticky stejné jako pro ABS, ale díky menší teplotní roztažnosti není nutné vyhřívat tiskový prostor. Doporučená teplota trysky je 230÷240°C a doporučená teplota podložky je 85°C. PETG může mít problémy s přilnavostí k tiskové podložce, proto se doporučuje použití přípravku pro zlepšení přilnavosti. Jedním z efektivních a dostupných přípravků je tyčinkové kancelářské lepidlo. PETG je chemicky odolnější než ABS i PLA, odolá i slabším organickým rozpouštědlům, a proto lze součásti mazat prakticky jakýmkoliv mazivem. [25] [33] [34] [35] [36]

5.1.4. Nylon

Nylon byl původně obchodní název pro polyamid 6.6 ale v současné době se používá jako souhrnný název pro celou skupinu polyamidů (PA). Pro 3D tisk FFF metodou se používá většinou PA6 nebo PA6.6. Nylon má výborné mechanické vlastnosti. Konvenčně zpracovaný má mez pevnosti 70 MPa. Jeho předností jsou výborné kluzné vlastnosti, dobrá teplotní stabilita a vynikající chemická odolnost. Řadí se mezi materiály velmi složité na tisk. Vyžaduje velmi vysokou teplotu trysky a vyhřívanou podložku. Doporučovaná teplota trysky je 280°C a podložky 65°C. Navíc má silné sklony k odlupování od podložky. Nylon zpracovaný metodou FFF má mez pevnosti 60 MPa a únavové vlastnosti jsou popsány závislostí

$$\log(\sigma) = 2,53 - 0,223 * \log(N) \quad (4)$$

pro $N > 100$, s časovou mezí únavy $\sigma_A(2\,000\,000) = 13,3 \text{ MPa}$.

Velkou nevýhodou nylonu je jeho vlhnutí. Pokud není nylon před tiskem suchý, tak voda, která se odpařuje během tavení, způsobí velkou a nekontrolovatelnou pórovitost součásti, čímž ji kompletně znehodnotí. Protože je nylon velmi chemicky odolný, lze jej mazat prakticky čímkoliv a může být použit i v relativně chemicky náročných prostředích. [37] [38] [39]

5.1.5. Ostatní materiály

V současné době je dostupné široké spektrum exotických materiálů i různých modifikací již existujících materiálů. Zajímavá je skupina flexibilních materiálů pro tisk těsnění nebo flexibilních součástí, nebo skupina snadno rozpustných materiálů, zejména pak skupina materiálů rozpustných ve vodě. Snadno rozpustné materiály se používají na tiskárnách schopných tisknout z více materiálů zároveň k tištění podpěr, které pak lze jednoduše odstranit ponořením součásti do vody. [20]

5.1.6. Shrnutí a porovnání materiálů

V tabulce 1 jsou srovnány materiály běžně používané pro 3D tisk.

Tabulka 1: Porovnání materiálů

Materiál	ABS	PLA	PETG	Nylon
R _m (typická) [MPa]	50	65	55	70
R _m (FFF) [MPa]	20	40	42	60
σ _A (2 000 000) [MPa]	3,1	6,1	6,8	13,3
teplota trysky [°C]	250	210	235	280
teplota podložky [°C]	100	60	85	65
hustota [g/cm ³]	1,04	1,24	1,23	1,15
chemická odolnost	špatná	dostatečná	dobrá	výborná
cena [kč/kg]	350÷600	330÷450	400÷500	1000÷1500

5.2. UV polymerizace

Pro tuto metodu se využívají UV aktivní pryskyřice, které je možné dopovat mikro částicemi. Pryskyřice jsou většinou silně toxické a produkují toxické páry. Vlastnosti pryskyřic se odvíjejí od typu a určení, ale typicky bývají křehké s matným povrchem. [40] [41]

6. Shrnutí možností 3D tisku a důležité parametry pro polymerová ozubená soukolí

Pro testování 3D tištěných kol je relevantní testování kol vyrobených metodou FFF, protože je široce rozšířená a dostupná. Tloušťka vrstvy je již kvalitně prozkoumána, a tudíž dává smysl volit tloušťku z osvědčeného rozmezí 0,15÷0,2mm. Tvar výplně se odvíjí od typu namáhání součásti a je nutné zvolit vhodnou výplň tak, aby vyhovovala složitému namáhání

zubu ozubeného kola. Zajímavým parametrem k prozkoumání je hustota výplně. Testování se zaměří na nalezení nejmenší hustoty výplně, která zároveň zbytečně neoslabeje ozubené kolo. Z rešerše vyplynulo, že nemá smysl zvyšovat hustotu nad 80%, a proto nebude vyšší hustota uvažována. Nejdůležitějším a nejzajímavějším parametrem je materiál 3D tištěných ozubených kol. Pro testování dávají největší smysl čtyři nejrozšířenější materiály, a to ABS, PLA, PETG a Nylon. S volbou materiálu se pojí i volba teplot tisku. Teploty tisku jsou určeny materiálem a výrobcem materiálu, a proto budou voleny podle doporučení výrobce.

7. Ozubená kola

Ozubené kolo je strojní součást určená k přenosu kroutícího momentu. Kroutící moment je přenášen kontaktem dvou tvarových ploch. Nejrozšířenější typ ozubení je tzv. evolventní ozubení. Boky zubů evolventního ozubení mají tvar evolventy. Výhodou evolventního ozubení je, že dotyk a tím pádem přenos výkonu se realizuje na úsečce. Tato úsečka se nazývá záběrová. Na ozubeném kole můžeme označit několik významných rozměrů, které jednoznačně popisují geometrii kola.

Hlavním parametrem ozubeného kola je počet zubů. Poměr počtu zubů kol v soukolí definuje převod soukolí. Ozubené kolo s menším počtem zubů se obvykle nazývá pastorek. Pokud nejsou definovány speciální požadavky na rozměry soukolí, volí se počet zubů pastorku nejmenší možný a počet zubů velkého kola se dopočte tak, aby mělo soukolí správný převod. Převod soukolí se určuje podle vzorce

$$i = \frac{z_2}{z_1} \quad (5)$$

kde, i je převod soukolí, z_1 je počet zubů vstupního kola a z_2 je počet zubů výstupního kola. Když je $i < 1$ tak je převod tzv. „do rychla“. To znamená, že otáčky výstupního hřídele jsou vyšší než otáčky vstupního a zároveň dostupný kroutící moment na výstupním hřídeli je menší než na vstupním. Pro $i > 1$ se převod nazývá „do pomala“ a průběhy otáček a momentů jsou opačné. Otáčky a momenty v soukolí jsou popsány těmito vztahy:

$$n_2 = \frac{n_1}{i} \quad (6)$$

$$M_{k2} = i * M_{k1} \quad (7)$$

kde, i je převod soukolí, n_2 jsou otáčky výstupního hřídele, n_1 jsou otáčky vstupního hřídele, M_2 je dostupný kroutící moment na výstupním hřídeli a M_1 je kroutící moment přiváděný na vstupní hřídel. Pro praktické využití bývá ve vztahu pro kroutící moment

zahrnuta účinnost soukolí. Po zahrnutí účinnosti je průběh momentu na soukolí popsán tímto vztahem:

$$M_{k2} = i * M_{k1} * \eta \quad (8)$$

přičemž η je účinnost soukolí a pro soukolí nabývá zpravidla hodnot $\eta \in (0,94; 0,99)$.

Druhým parametrem určujícím geometrii kola je modul ozubení. Pro správnou funkci ozubených kol musí mít všechna spoluzabírající kola stejný modul. Modul ozubení má přímou vazbu na velikost zubů i na únosnost ozubeného kola.

Hodnoty modulů ozubení jsou normalizovány dle ČSN 01 4608, konkrétní hodnoty jsou v tabulce níže (viz. Tabulka 2)

Tabulka 2: Normalizované moduly ozubení dle ČSN 01 4608 (tučně doporučené hodnoty)

0,1	0,11	0,12	0,14	0,15	0,18	0,2	0,22	0,25	0,28
0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,7	0,8	0,9
1	1,125	1,25	1,375	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75
3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8	9
10	11	12	14	16	18	20	22	25	28

Modul ozubení představuje vazbu mezi počtem zubů a průměrem kola. Nejdůležitější průměr kola se nazývá roztečný. Roztečné kružnice všech kol v záběru jsou vždy tečné a bod dotyku je vždy středem záběrové úsečky. Velikost roztečného průměru určuje vztah.

$$d = z * m \quad (9)$$

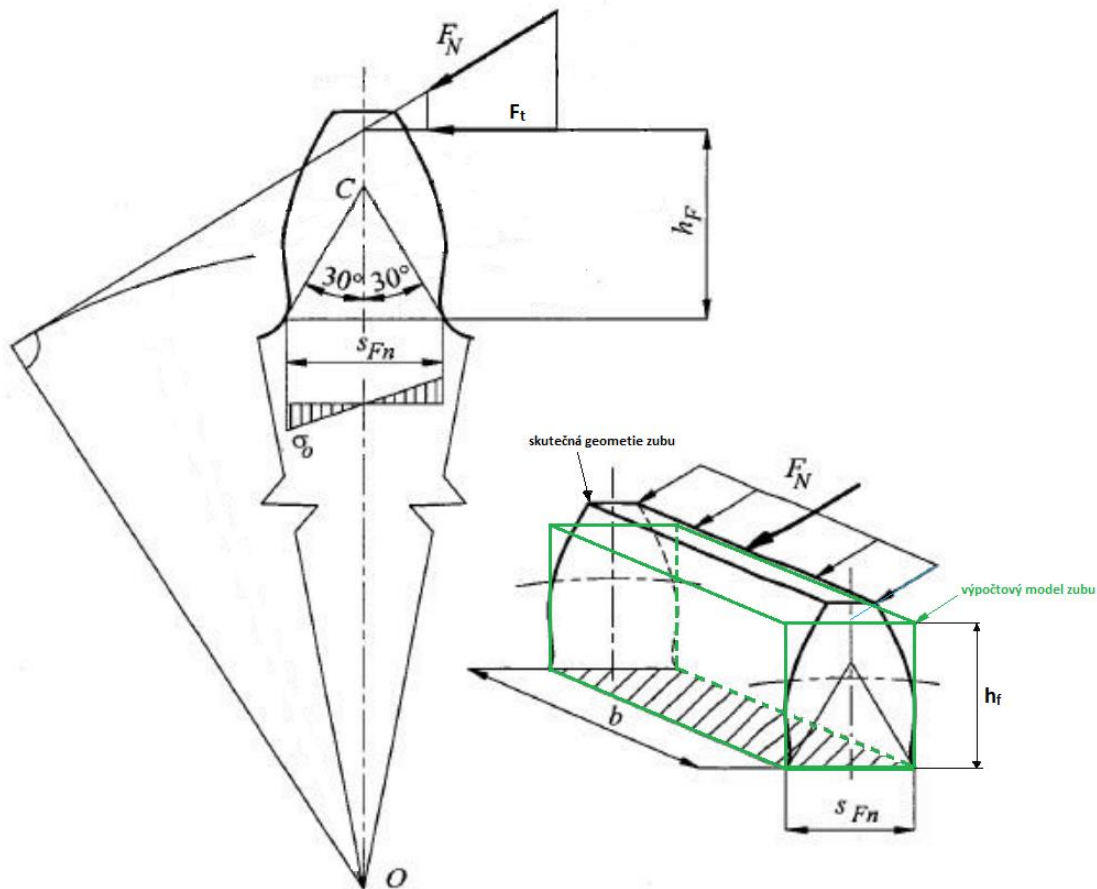
kde, d je roztečný průměr, z je počet zubů a m je modul ozubeného kola.

8. Návrh měření

Testování 3D tištěného kola bude realizováno ve dvou módech.

8.1. Statické testování

V první fázi bude kolo testováno statickým zatížením až do porušení v patě zubu. Tento test bude sloužit ke zjištění skutečných mechanických vlastností 3D tištěného materiálu. Hodnoty budou porovnány s hodnotami zjištěnými v rešeršní části a případně budou korigovány závěry z rešerše.



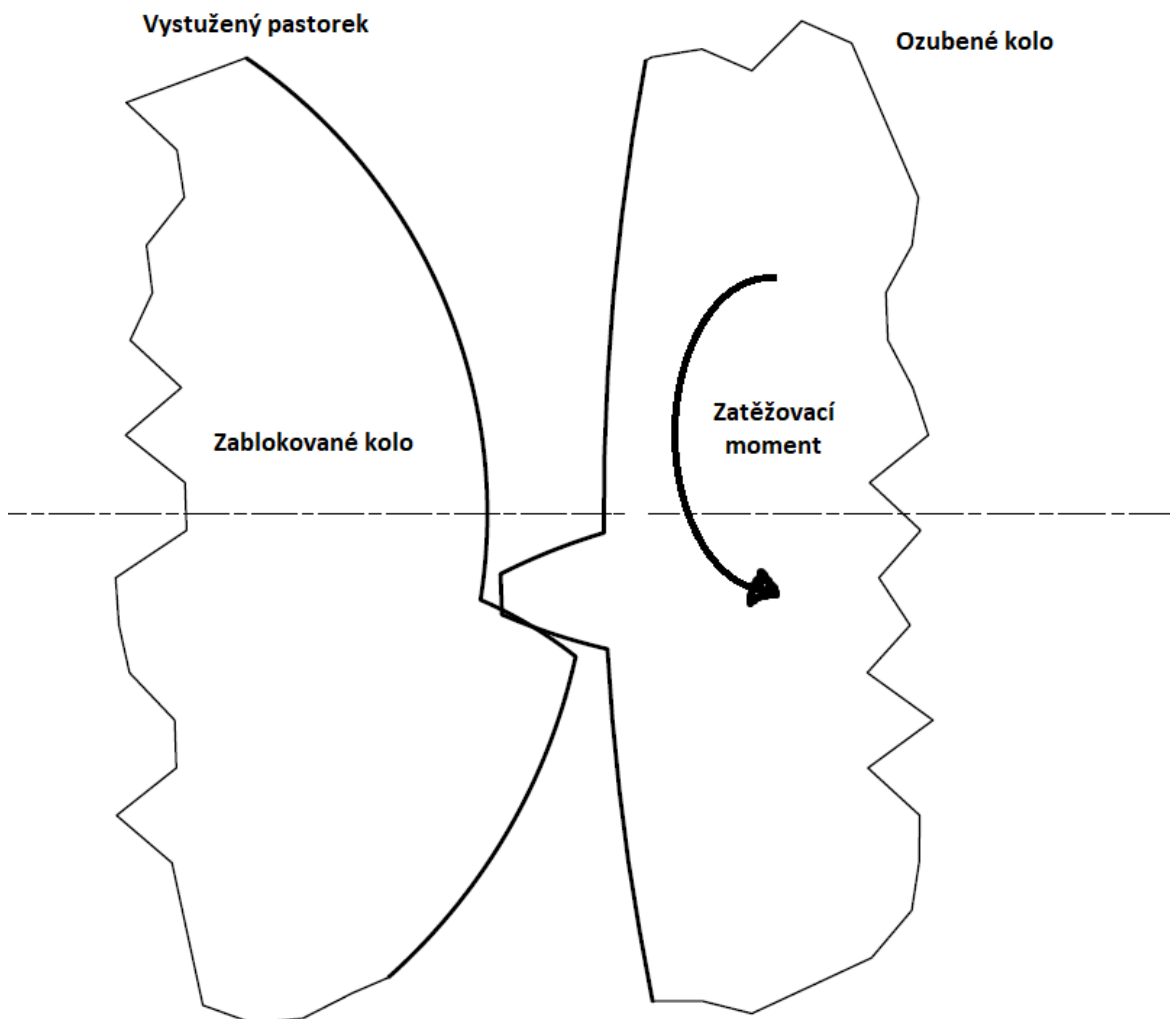
Obrázek 7: Princip kontroly zubu na ohyb (z [42], upraveno)

Statický test bude prováděn tak, že nejprve bude hřídel s pastorkem zablokována 3D tištěnou blokovací pákou (Obrázek 10) tak, aby bylo ozubené kolo v záběru. Páka bude opřena o konstrukci měřící trati. Pastorek bude vytištěn jako součást hřídele a ozubené kolo bude uchyceno pomocí těsného pera a stavěcího šroubu (Obrázek 17). Dále bude postupně na hřídel s ozubeným kolem přiváděn kroutící moment 3D tištěnou zatěžovací pákou (Obrázek 10) až do porušení ozubeného kola. Konfigurace statického testu (Obrázek 11). Testovací vzorky budou upraveny tak, aby se zajistila forma zatížení, která se používá pro výpočet napětí v ozubení (Obrázek 7). Pro tento účel bude vyrobeno soukolí pouze s jedním zubovým párem a zub na pastorku bude vyztužen, aby se zaručilo poškození na ozubeném kole (Obrázek 8). Kvůli efektivnějšímu využití testovacího kola, bude na testovacím kole vyrobeno 10 testovacích zubů po 36° (Obrázek 9). Po provedení testu bude odečten zatěžovací moment a z pevnostní kontroly zpětně určena mez pevnosti 3D tištěného

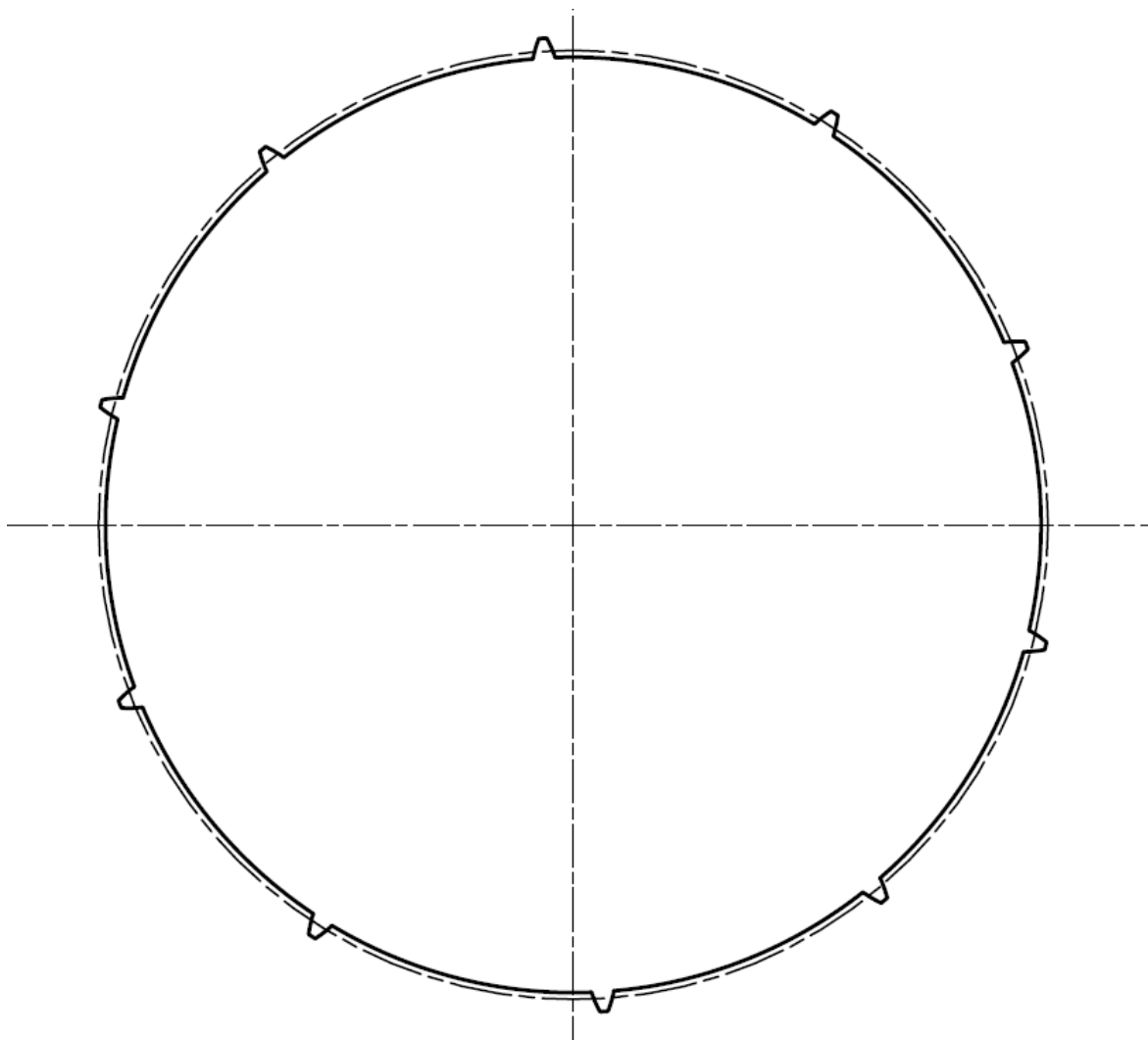
materiálu. Skutečný zub bude nahrazen výpočtovým modelem (Obrázek 7) a poté bude určena mez pevnosti dle vztahu.

$$\sigma_o = \frac{6 \cdot F_t \cdot h_f}{b \cdot s_{fn}^2} \quad (10)$$

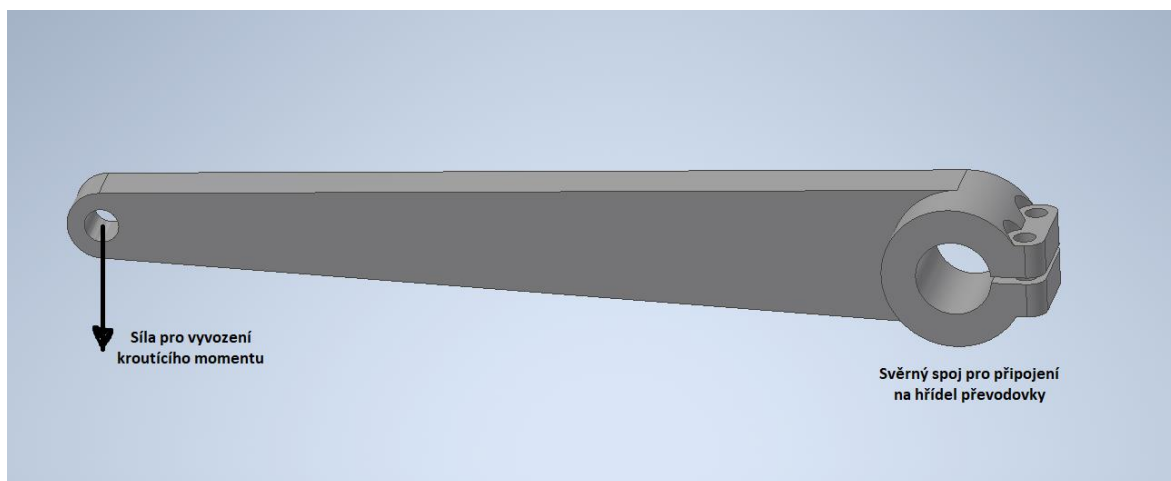
Staticky budou testovány pouze různé materiály. Aby bylo zajištěno správné zatížení zubu bude pro statické testy použito přímé ozubení. Další parametry ozubení budou stejné jako v původní převodovce, tj. modul 1,25mm, úhel záběru 20°, osová vzdálenost 80mm, převod 4, počet zubů pastorku 25 a šířka věnce 30mm.



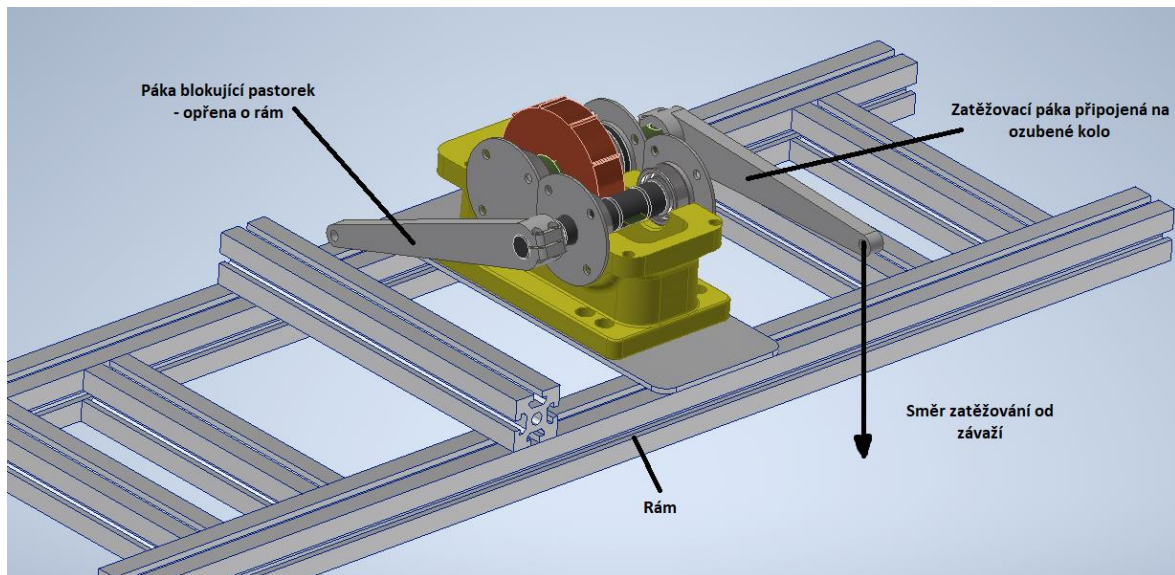
Obrázek 8: Upravené soukolí pro statický test



Obrázek 9: Testovací vzorek pro statický test



Obrázek 10: Páka pro blokování a zatěžování převodovky



Obrázek 11: Konfigurace statického testu

8.2. Dynamické testování

Druhá fáze bude testovat únavové chování 3D tištěných kol. Kola budou zatížena tak, aby byla zajištěna přijatelná doba trvání testu. Kola budou testována do porušení. Za porušení bude považována buď úplná ztráta zubu, oddělení významné části zubu, nebo viditelná změna tvaru zubu vlivem tepla. Výstupem testu bude srovnání experimentálně stanovené životnosti s teoreticky určenou životností a také forma selhání jednotlivých kol. Forma selhání bude sloužit k odhalení případných rozdílů v chování jednotlivých materiálů a jejich případná citlivost na konkrétní složku zatížení v ozubeném soukolí.

8.3. Konfigurace dynamických testů

Vzhledem k upravované převodovce jsou možné dvě konfigurace měření.

8.3.1. Plastové ozubené kolo s ocelovým pastorkem

První možnost je nahrazení velkého ozubeného kola a ponechání původních hřídel a původního pastorku (Obrázek 19). Touto konfigurací je možné zkoumat pouze výrobní parametry ozubeného kola. Geometrie ozubení je pevně daná původním pastorkem (viz. geometrie 1, Tabulka 5).

Aby nebylo vzorků zbytečně velké množství, byly vybrány parametry, které by měly mít největší vliv na vlastnosti kola. Teploty tisku jsou zejména určeny zvoleným materiálem a jsou pro každý materiál jiné, proto budou nastaveny tak, aby maximalizovaly potenciál každého materiálu. Tloušťka vrstvy byla zvolena 0,2mm, což je obecně přijímaná a zpravidla

nejlepší hodnota (viz. kap. 4.1.). Po eliminaci těchto parametrů zbývá materiál, podoba výplně, hustota výplně a počet okrajových vrstev.

Pro testování byly vybrány čtyři nejpoužívanější materiály – ABS, PLA, PETG a nylon. Vzorky budou vyrobeny s 80% výplní a pěti hraničními vrstvami. Vysoká hustota výplně je zvolena proto, aby se neprojevilý případné vlivy nižších hustot výplně. Mechanické vlastnosti budou testovány na pěti vzorcích z každého materiálu. Z ABS bude vyrobeno dalších pět vzorků, které budou vyhlazeny acetonem a budou sloužit ke studiu vlivu vyhlazení na mechanických vlastnostech.

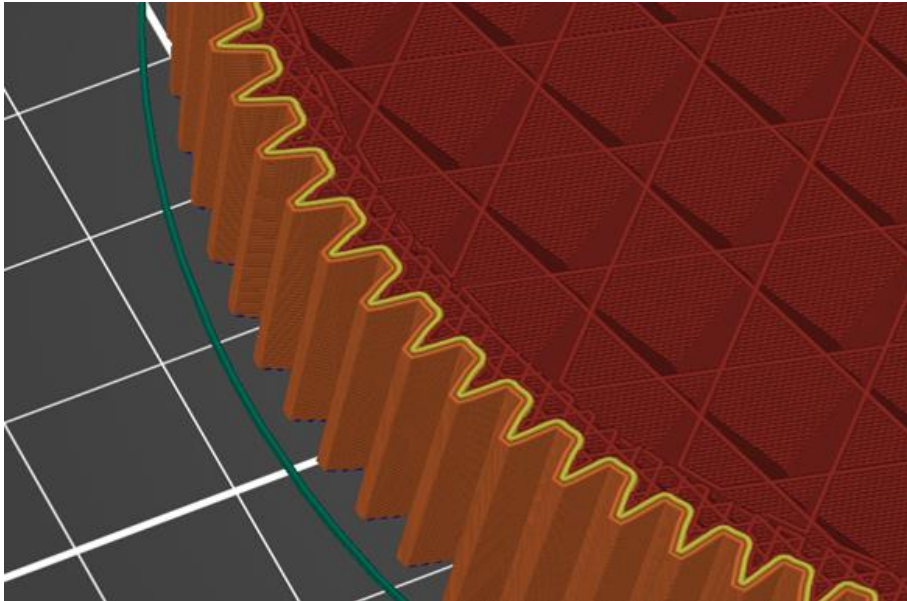
Při volbě výplně je nezbytné zvážit podobu zatížení součásti s uvážením orientace součásti v tiskovém prostoru. Vzhledem ke tvaru ozubeného kola lze předpokládat, že v devadesáti procentech případů bude kolo orientováno tak, že kolo bude souosé s osou z tiskárny. Pro ozubené kolo s přímými zuby by toto byla dokonalá orientace, neboť zatížení se realizuje pouze v rovinách řezu, protože v ozubení nevznikají axiální síly. Soukolí v měřící převodovce je ale šikmé, a proto zvolená výplň musí být schopná přenášet i axiální síly vznikající na ozubení. Z toho důvodu se jeví skupina trojrozměrných výplní pro tuto aplikaci vhodnější. Z této skupiny byla zvolena kubická výplň, protože je dostatečně izotropní a zároveň není zbytečně složitá. Jiné typy výplní nebudou uvažovány.

Hustota výplně významně ovlivňuje nejen pevnost součásti, ale také časovou náročnost výroby a hmotnost (Tabulka 3). Tradiční přístup k volbě hustoty výplně je zvolení hustoty pro celou součást tak aby v nejnamáhanějším místě nedošlo k porušení součásti. Tento přístup vede ke zbytečnému předimenzování součásti v méně namáhaných místech a je obzvláště nevhodný při výrobě ozubených kol, protože je žádoucí tisknout zuby se 100% výplní ale zbytek kola už ne.

Tabulka 3: Srovnání délek tisku a spotřeby materiálu při různých hustotách výplně

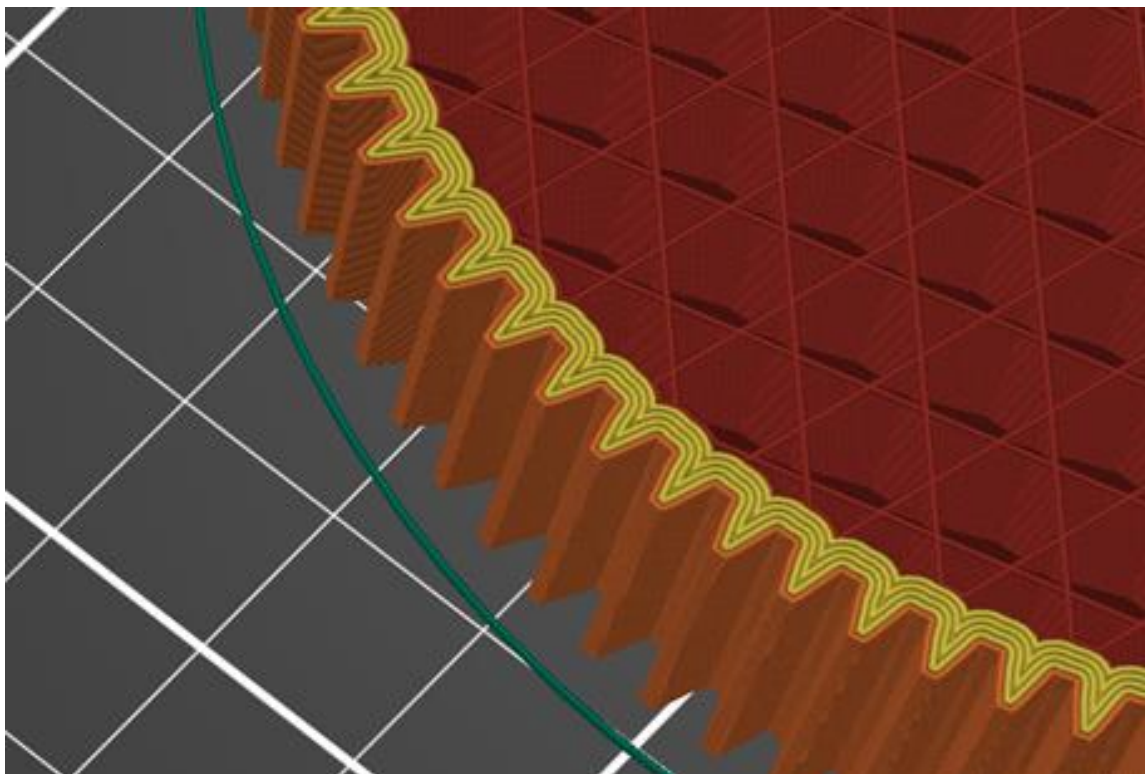
hustota výplně	80%	60%	40%	20%	10%
délka tisku	15h 11min	12h 53min	10h 26min	7h 49min	6h 24min
spotřeba materiálu [g]	308	245	181	117	84

Částečným řešením je tzv. „variabilní výplň“. Variabilní výplň umožňuje ve vybraných oblastech upravit jak typ, tak hustotu výplně (Obrázek 12).



Obrázek 12: Ukázka kola s variabilní výplní (z programu PrushaSlicer)

Pro výrobu testovacích vzorků byla však použita třetí metoda, která je pro výrobu ozubených kol nejvýhodnější. Spočívá ve zvýšení počtu hraničních vrstev až do bodu, kdy jsou zuby kompletně vyplněny (viz Obrázek 13). Tak je dosaženo pevných zubů a úsporného jádra. Hustota výplně ve zbytku kola bude nejprve nastavena na 80 % a poté snižována po 10 %, dokud k porušení kola nedojde jinde než v patě zubu. Vliv hustoty výplně bude testován na třech vzorcích z materiálu s nejlepšími mechanickými vlastnostmi.



Obrázek 13: Podoba vyplnění zubů kola (z programu PrushaSlicer)

Tabulka 4: Soupis testovacích vzorků

vlastnost	počet vzorků	vlastnost	počet vzorků	vlastnost	počet vzorků
ABS	5	80% výplně	3	30% výplně	3
ABS – vyhlazený	5	70% výplně	3	20% výplně	3
PLA	5	60% výplně	3	10% výplně	3
PETG	5	50% výplně	3		
Nylon	5	40% výplně	3		

8.3.2. Celoplastové soukolí

Druhá možnost je nahrazení celého soukolí. V tomto měření bude kladen důraz na geometrii ozubení, a proto všechna kola budou vyrobena stejně z materiálu s nejlepšími mechanickými vlastnostmi. K testování byly vybrány čtyři různé geometrie ozubení (Tabulka 5). Všechny geometrie mají stejnou osovou vzdálenost 80 mm danou skříní převodovky.

První geometrie je stejná jako původní ozubení, tj. modul 1,25mm, úhel profilu 20°, úhel šroubovice 12°, převod 4 a počet zubů pastorku 25. Tato geometrie byla zvolena proto, aby bylo možné porovnat chování celoplastového soukolí a soukolí s ocelovým pastorkem a plastovým kolem.

Druhá a třetí geometrie bude sloužit ke zkoumání vlivu změny modulu. Ozubení bude mít modul 2 mm respektive 0,8 mm, úhel profilu 20°, úhel šroubovice 12°, převod 4 a počet zubů pastorku 15, respektive 40.

Čtvrtá geometrie zkoumá vliv úhlu profilu. Ostatní parametry budou totožné s první geometrií. Ozubení bude mít modul 1,25 mm, úhel profilu 30°, úhel šroubovice 12°, převod 4, počet zubů pastorku 25.

Tabulka 5: Shrnutí testovaných geometrií ozubení

geometrie		1	2	3	4
modul	m_n [mm]	1,25	2	0,8	1,25
úhel profilu	α_n [°]	20	20	20	30
valivý úhel	α_w [°]	20,243	25,529	20,479	30,154
tečný valivý úhel	α_{tw} [°]	20,658	26,068	20,900	30,708
úhel šroubovice	β [°]	12	12	12	12
valivý průměr (pastorek/oz. kolo)	d_w [mm]	32/128	32/128	32/128	32/128
šířka věnce	b [mm]	30	30	30	30
převod	i [-]	4	4	4	4
počet zubů pastorku	z_1 [-]	25	15	40	25
šířka paty zubu (pastorek/oz. kolo)	s_F [mm]	2,67/2,76	4,46/4,75	1,74/1,82	3,13/3,34
výpočtová výška zubu (pastorek/oz. kolo)	h_F [mm]	2,54/2,53	3,6/3,48	1,64/1,7	2,63/2,58

Po vyhodnocení měření různých geometrií a vybrání nejvhodnější, budou s touto geometrií otestovány kombinace různých materiálů, aby byla odhalena případná nežádoucí interakce mezi dvěma materiály.

8.4. Průběh měření

Součástí návrhu měření je i testovací metodika, které zaručí opakovatelná a srovnatelná měření.

8.4.1. Statický test

Statický test bude probíhat následovně. Nejprve bude zajištěna hřídel s pastorkem, tak aby ozubené kolo zabíralo na hlavovém průměru. Poté bude na hřídel s ozubeným kolem připevněna zatěžovací páka tak, aby byla vodorovně. Následně budou na zatěžovací bod páky postupně přidávána 1kg závaží v intervalu jedno závaží za 15 sekund až do porušení. Tento postup bude opakován pro všech deset testovacích zubů. Počet závaží na páce se bude pohybovat mezi 5 pro nejméně odolný materiál a 20 pro nejodolnější materiál.

8.4.2. Dynamický test

První fází dynamického testu bude záběhová fáze. Během ní, bude ozubení zatíženo pouze mechanickými ztrátami v měřícím okruhu, tj. brzdný motor bude odpojen. Záběh bude proveden při čtyřnásobku testovacích otáček, tj. 4000 otáček za minutu na pastorku a 1000 otáček za minutu na ozubeném kole. Záběhová fáze bude trvat 5 minut.

Po dokončení záběhové fáze bude soukolí důkladně prohlédnuto, aby bylo odhaleno případné poškození záběhem. Mezi záběhem a dynamickým testem bude 15 min přestávka, aby soukolí mělo čas vychladnout.

Zaběhnuté a vychladlé soukolí bude zatíženo navrženým zatížením (Tabulka 6,

Tabulka 7) a budou nastaveny pracovní otáčky. Prvních 40 hodin testu bude soukolí kontrolováno každých 8 hodin, dalších 6 hodin testu každou hodinu a poslední dvě hodiny každých 15 minut.

9. Návrh, výpočty a kontrola polymerového ozubení

Konfigurace měření je zvolena v souladu s normou JIS B 1736 [43], dále jen JIS. Dle této normy je navržena metodika testování, ale ozubení je kontrolováno dle VDI 2736 [43], dále jen VDI. K tomuto rozdělení bylo nutné přistoupit proto, že VDI nemá definovanou podobu testování. Na druhou stranu, japonské normy nejsou v Evropě zdaleka tak rozšířené jako německé, a proto by kontrola mohla ztrácet na významu. Proto byl zvolen kompromis, ozubení je kontrolováno podle VDI a podoba testování je zvolena podle JIS, což VDI umožňuje. Díky této konfiguraci budou naměřená data použitelná i pro případnou pozdější kontrolu dle JIS.

9.1. Pevnostní kontrola ozubení dle VDI 2736

Kontrola ozubení dle VDI vychází z normy DIN 3990. Zuby se kontrolují na ohyb při vstupu do záběru, kdy reakční síla působí na hlavu zubu. Norma dále zavádí korekční součinitele, které zohledňují skutečný tvar zubu a skutečnou podobu namáhání. Ohybové napětí se počítá dle vzorce

$$\sigma_o = K_F * Y_{Fa} * Y_{Sa} * Y_\epsilon * Y_\beta * \frac{F_t}{b * m_n} \quad (11)$$

kde K_F je součinitel zatížení zubu, Y_{Fa} součinitel tvaru zubu, Y_{Sa} součinitel korekce zatížení, Y_ϵ součinitel záběru, Y_β součinitel šroubovice, F_t tečná složka reakce, b šířka kola a m_n je normálový modul. [43]

Určení ohybového napětí značně komplikuje přítomnost korekčních součinitelů, protože jejich hodnota je určována empiricky. Některé jsou popsány empirickými vztahy, které umožňují alespoň částečnou extrapolaci naměřených hodnot na další podobné aplikace, ale některé jsou vztaženy pouze ke konkrétní aplikaci. Pro jiné případy je nutné je znovu experimentálně určit. Norma VDI nabízí vztahy pro některé korekční součinitele.

Protože jsou zuby ozubení cyklicky namáhané, je třeba vypočtené ohybové napětí porovnat s únavovou křivkou. Tato kontrola ovšem naráží na další problém při navrhování polymerového soukolí. Plasty jsou stále relativně mladý konstrukční materiál, a proto nejsou jejich únavové vlastnosti zdaleka tak kvalitně prozkoumány jako u konstrukčních kovů zejména ocelí.

Pro kontrolu ozubení byl využit výpočetní program KissSoft 2018 sp3. Statická kontrola byla provedena tak, že požadovaná životnost soukolí byla nastavena 0,01 hodin. Dynamická kontrola byla navržena tak, aby bylo možné v rozumném čase otestovat velké množství soukolí. Toto zjednodušení nepředstavuje významný problém, neboť plastová kola musí být vždy dimenzována na časovou mez únavy. Čas do únavového lomu byl volen do 48 hodin, tj. do 720 000 cyklů. Dynamické testování je v oblasti vysoko-cyklové únavy ale stále relativně daleko od „nekonečné“ životnosti, přesto budou naměřená data stále hodnotná, neboť budou sloužit k ověření modelů získaných v rešeršní části. Vyhlazené kolo z ABS nebylo kontrolováno v KissSoftu, protože k vyhlazenému ABS nejsou dostupná data, a vyhlazené vzorky budou sloužit zejména ke sledování změn chování ABS při vyhlazení.

Kvůli velkým rozdílům ve vlastnostech materiálů není praktické je porovnávat při stejném zatížení, a proto budou porovnávány podle zatížení, při kterém bude mít kolo z testovaného materiálu životnost 48 hodin. Geometrie budou porovnávány podle životnosti při zatížení 3 Nm na pastorku.

Tabulka 6: Výsledky kontroly ozubení pro testované materiály (Příloha 4)

materiál		ABS	PLA	PETG	nylon
statická	moment na pastorku [Nm]	2,8	5,3	7,4	12,7
dynamická	moment na pastorku [Nm]	0,45	1,7	2,5	4
	životnost [h]	48	48	48	48

Tabulka 7: Výsledky kontroly ozubení pro testované geometrie ozubení (Příloha 4)

geometrie		1	2	3	4
dynamická	moment na pastorku [Nm]	3	3	3	3
	životnost [h]	35	26	20	40

Výsledky pevnostních kontrol kopírují vlastnosti materiálů, což bylo očekáváno, neboť vlastnosti materiálů z rešerše byly vstupem do pevnostních kontrol v KissSoftu. Naměřené hodnoty se budou pravděpodobně významně lišit při dynamickém zatěžování. Tato odchylka bude způsobena tím, že norma VDI nekontroluje porušení ozubení vlivem zvýšené teploty, což je ale velmi častá forma porušení, obzvláště u ozubení provozovaného nasucho. Porušení vlivem teploty spočívá v měknutí materiálu a následným přetvořením zubu. V případě, že dojde k porušení teplem, bude nutné snížit zatížení a prodloužit délku testu nebo případně testovat ozubení s mazivem, to ale ani VDI ani JIS nedoporučuje. Z testovaných materiálů se jeví jako nejlepší nylon. Kvůli jeho náročnosti na zpracování byl pro testování geometrií vybrán PETG.

9.2. Síly v ozubení

Pro potřeby návrhu ozubeného kola, úpravy převodovky a návrhu měřícího standu je nutné znát síly v ozubení při dynamických testech. V ozubení vzniká tečná složka síly (F_T) od přenášeného kroutícího momentu, radiální složka síly (F_R) od úhlu záběru a axiální složka síly (F_A) od úhlu šroubovice (Obrázek 14). Pro síly v šikmých zubech platí vztahy

$$F_T = \frac{2 \cdot M_k}{d_w} \quad (12)$$

$$F_A = F_T \cdot \tan(\beta) \quad (13)$$

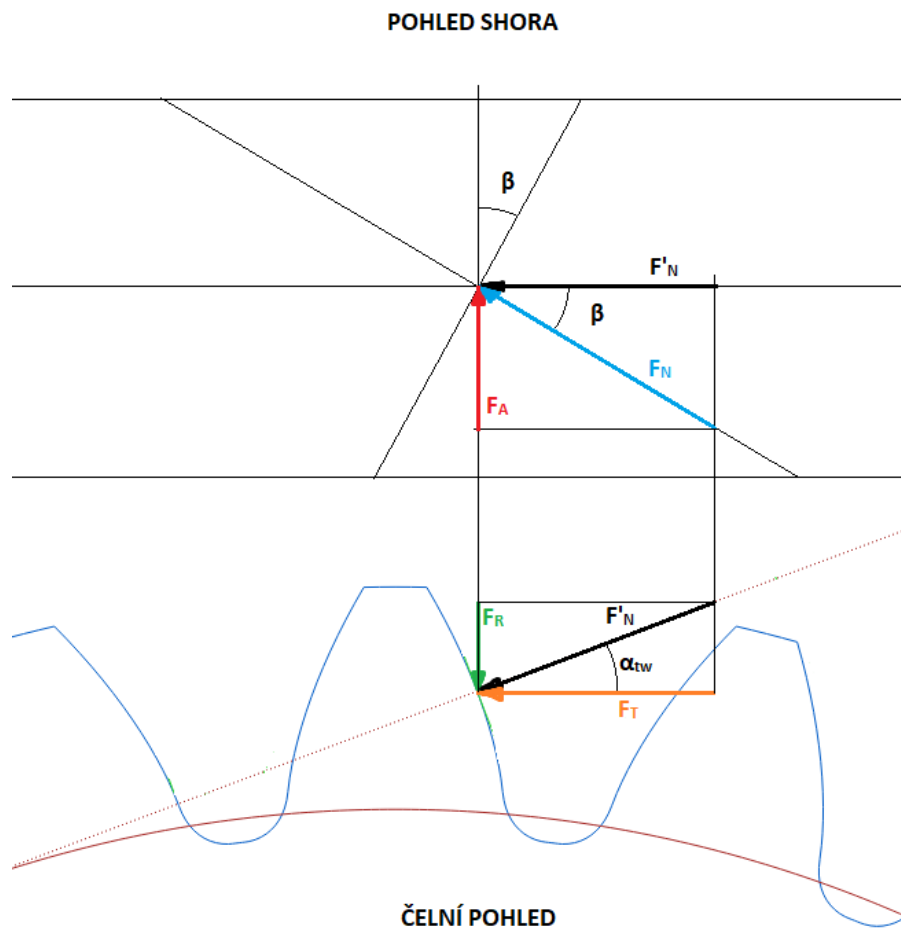
$$F_R = F_T \cdot \tan(\alpha_{tw}) \quad (14)$$

Síly v ozubení byly určeny pro všechny uvažované geometrie ozubení (Tabulka 7). Protože materiály jsou testovány na geometrii 1 bylo pro geometrii 1 vybráno největší

zatížení z testování materiálů (Tabulka 6), tj. zatížení při testování nylonu. Síly v ozubení pro jednotlivé geometrie jsou v Tabulka 8

Tabulka 8: Síly v ozubení pro různé geometrie

geometrie		1 (nylon)	2 (PETG)	3 (PETG)	4 (PETG)
moment na pastorku	M_k [Nm]	4	3	3	3
tečná složka	F_T [N]	250	187,5	187,5	187,5
axiální složka	F_A [N]	53,1	39,9	39,9	39,9
radiální složka	F_R [N]	94,2	91,7	71,6	111,3



Obrázek 14: Síly v ozubení

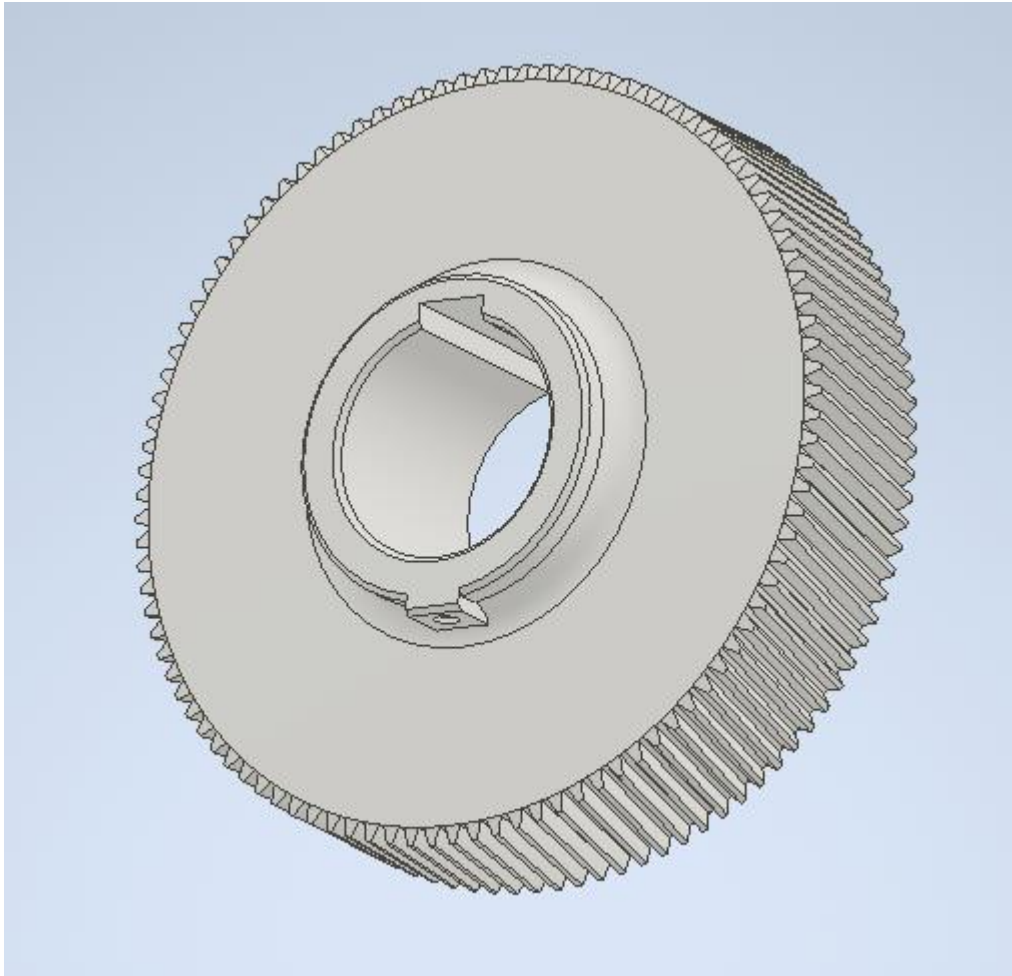
10. Návrh testovaného kola

Ozubené kolo je navrženo bez odlehčovacích prvků, protože odlehčovací prvky by komplikovaly výrobu kola, a odlehčení kola bude řešeno snížením hustoty výplně. Šikmé

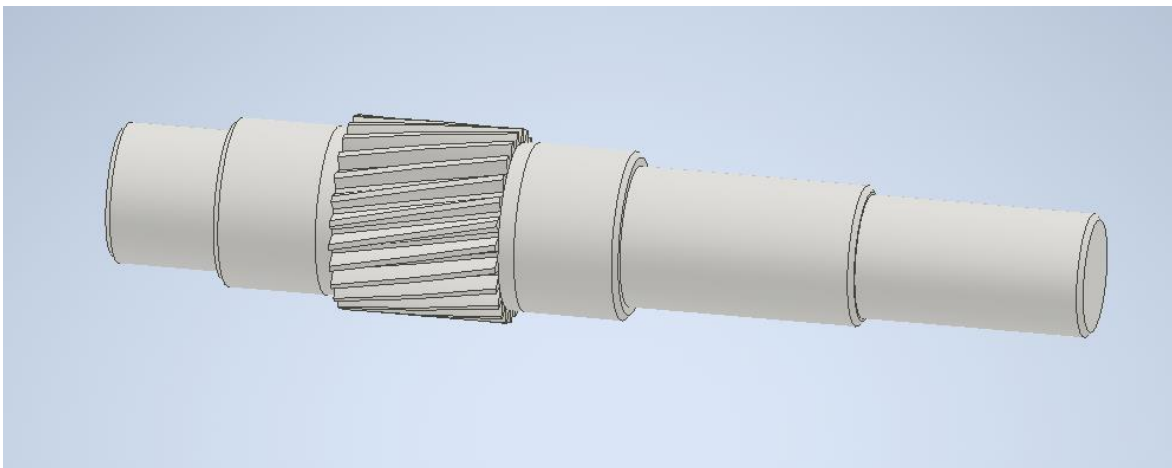
ozubení generuje axiální síly, které bylo možné v původní převodovce zachytit opřením o kuželíkové ložisko. Kvůli mazání byla kuželíková ložiska nahrazena kuličkovými, která mají menší opěrnou plochu na vnitřním kroužku, a tudíž neumožňují opření ozubeného kola. Z toho důvodu bylo nutné navrhnout axiální zajištění ozubeného kola. Od malé pevnosti plastového ozubeného kola se odvíjí malé zatížení ozubení, a tím i malé axiální síly (Tabulka 8). Proto jako axiální zajištění byl zvolen stavěcí šroub. Bude použit samořezný šroub do plastu (např. K 30 x 14 WN 1452 / T10) a do ozubeného kola bude pro něj vytištěna příprava. Aby bylo kam umístit stavěcí šroub, bude ozubené kolo opatřeno nábojem a na něm vyrobena ploška pro stavěcí šroub. Přejechod mezi nábojem a ozubeným kolem bude vyhlazen velkým zaoblením, aby se nezhoršily únavové vlastnosti ozubeného kola (Obrázek 17, Obrázek 15). Tato konstrukce bude společná pro všechny vzorky a bude se měnit pouze materiál nebo tvar ozubení.

Hřídel s pastorkem nebude nijak upravována, pouze bude změněna geometrie ozubení. Rozměry hřídele budou získány oměřením původní hřídele s pastorkem. Protože pastorek má patní průměr menší, než je průměr, musí být vždy vyroben dohromady se hřídelí (Obrázek 16).

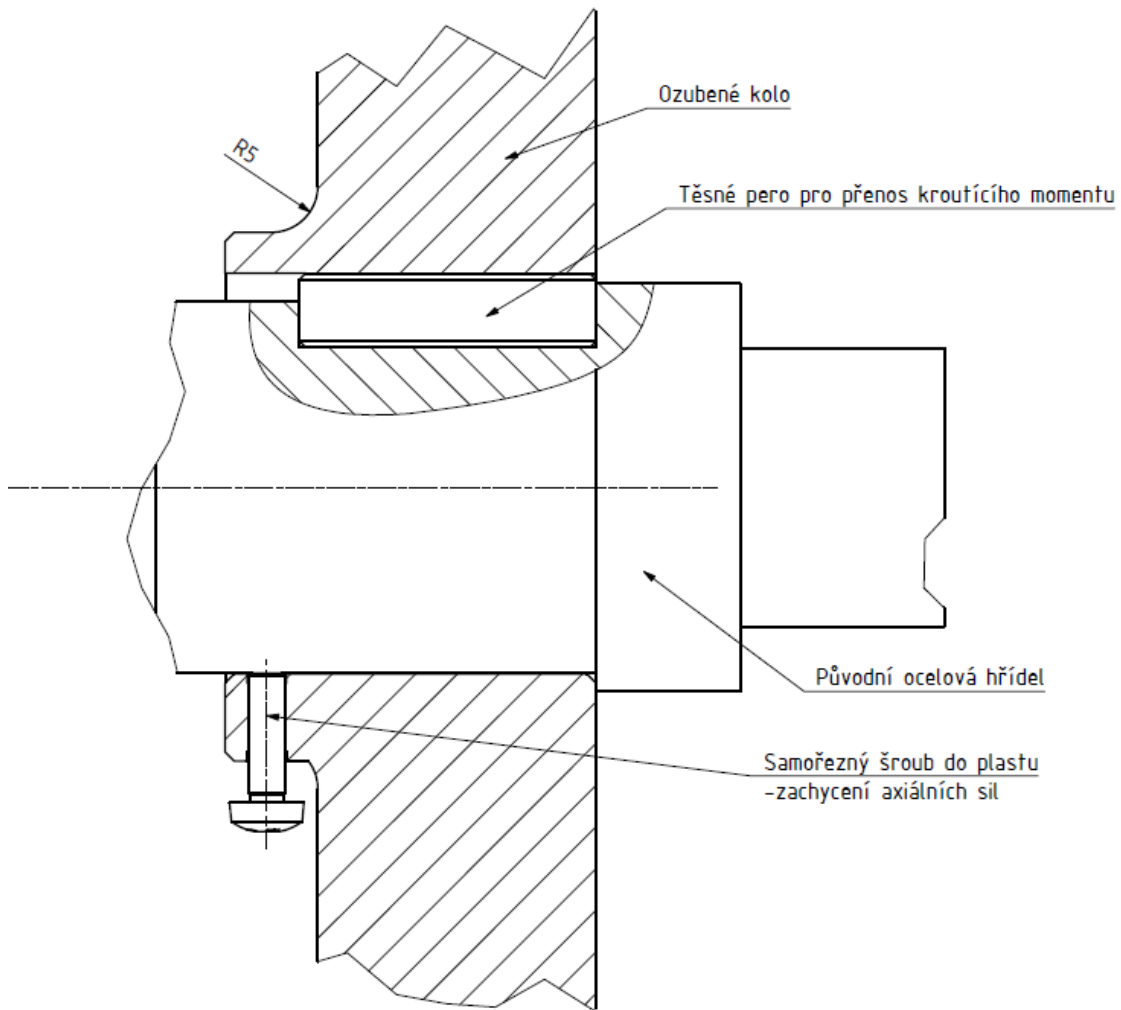
Problémem 3D tištěných sestav je lícování. Ukázalo se, že 3D tištěné součásti mají všechny obrysové křivky v rovině xy (vzhledem k souřadnému systému tiskárny) posunuté o přibližně 0,1mm směrem ven ze součásti. Tato odchylka může být způsobena z části nepřesnostmi při převodu 3D modelu z CAD softwaru na 3D model pro tisk a z části roztečením 3D tištěného materiálu při extruzi. Na tuto změnu rozměrů je nutné pamatovat při modelování 3D tištěných součástí. V praxi se osvědčilo posunout každou plochu o 0,1mm dovnitř součásti. Tím se zaručí smontovatelnost sestav 3D tištěných dílů většinou s minimální vůlí. Takto bude přistoupeno ke všem funkčním plochám, kromě ozubení. Jakékoliv přesahy v ozubení budou řešeny záběhem ozubení.



Obrázek 15: Model ozubeného kola



Obrázek 16: Model hřídele s pastorkem

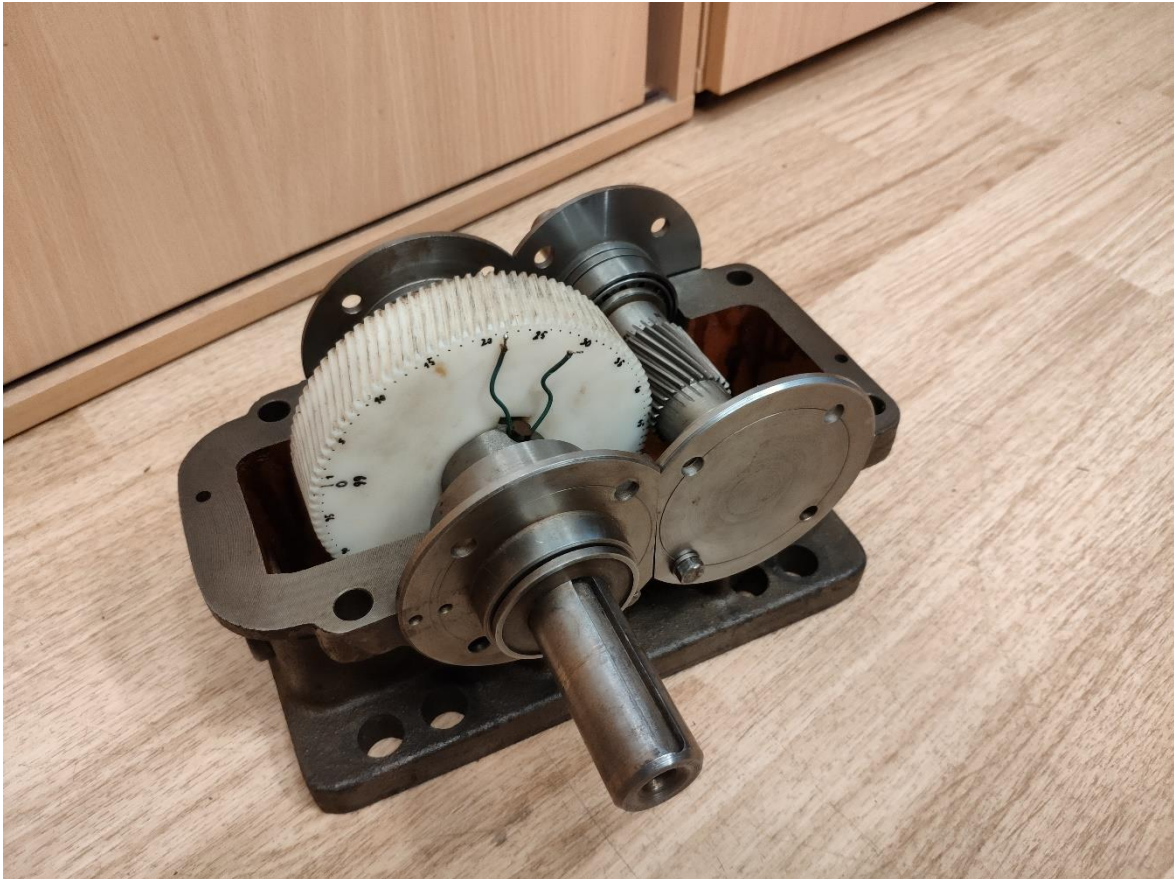


Obrázek 17: Spojení ozubeného kola se hřídelí

K návrhu dílů pro statické testy bude přistoupeno identicky jako k návrhu dílů pro dynamické testy. V CAD softwaru budou odříznuty všechny zuby až na deset testovacích na ozubeném kole a jeden na pastorku, kde bude přidáno zpevnění zubu (Obrázek 8). Pro bezpečnost při testování bude na ozubeném kole ponechán zajišťovací šroub, přestože v ozubení nebudou generovány žádné axiální síly.

11. Model převodovky

Protože cílem práce je upravit již existující převodovku (Obrázek 18) pro použití polymerových kol, je většina rozměrů předem daná (viz. Tabulka 9). Konstrukce převodovky nabízí dvě podoby testování 3D tištěných kol.



Obrázek 18: Foto upravované převodovky

Tabulka 9: Parametry testované převodovky

počet zubů pastorku	z_1	25
počet zubů velkého kola	z_2	100
normálový modul	m_n	1,25 mm
osová vzdálenost	a_w	80 mm
úhel šroubovice	β	12°
úhel záběru	α	20°
šířka kola	b	30 mm

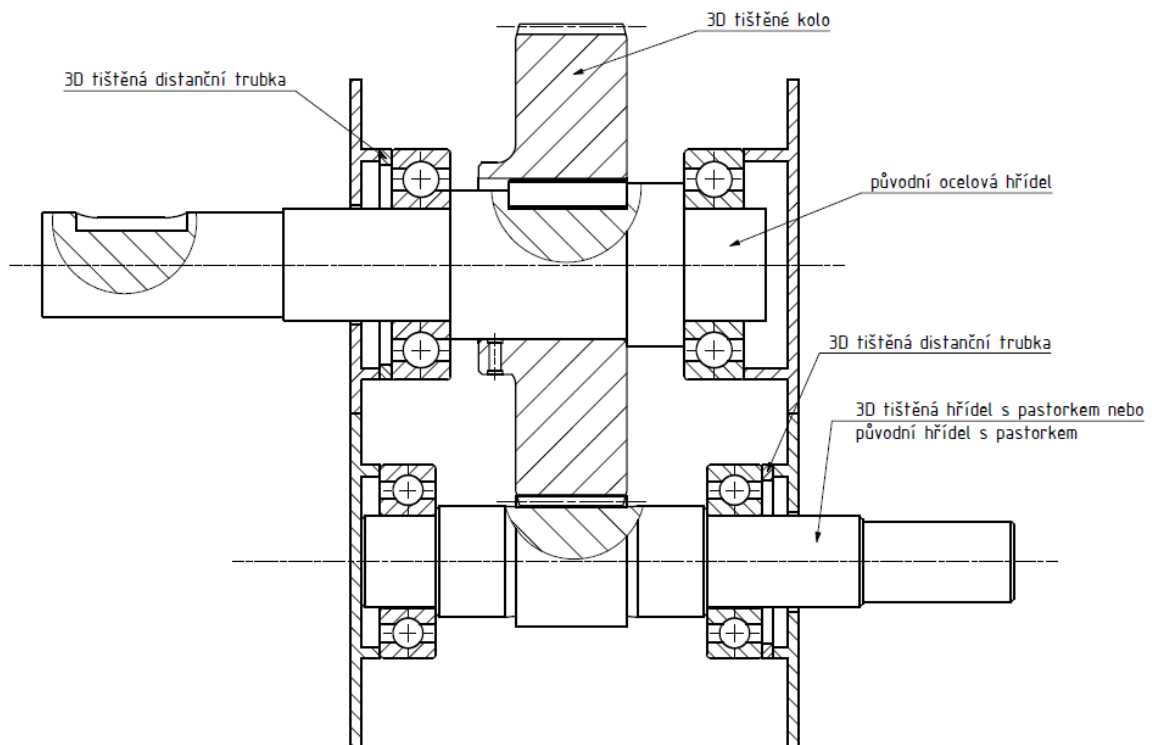
11.1. První konfigurace testování

Výhodou této konfigurace je velmi jednoduchá příprava měření. Původní kolo bylo nasazeno na hřídeli a výkon byl přenášen těsným perem (Obrázek 17). Celá úprava by tedy spočívala v přemodelování původního kola. Další výhodou je malé množství proměnných, neboť jediným testovaným prvkem je velké ozubené kolo, protože ostatní ocelové součásti jsou mnohonásobně pevnější než plastové kolo. Tato konfigurace je také v souladu s doporučeným testováním plastových kol dle JIS. Velkou nevýhodou jsou pevně dané parametry ozubení, což znamená, že touto konfigurací je možné zkoumat pouze výrobní

parametry, jako např. výplň, materiál atd. Touto konfigurací není možné optimalizovat geometrii ozubení.

11.2. Druhá konfigurace testování

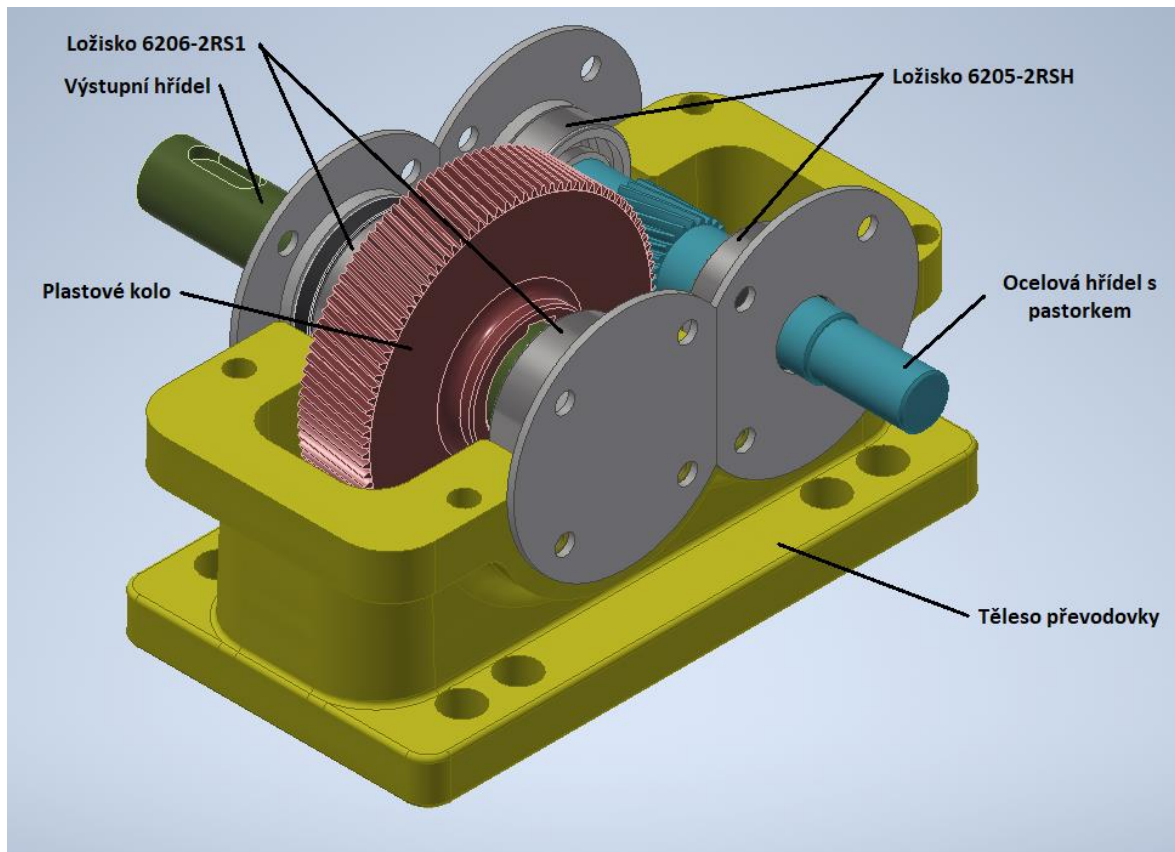
Druhá možná konfigurace měření je výměna celého soukolí. Protože je pastorek součástí hřídele, bylo by nutné vyměnit i hřídel (Obrázek 19). Jediným zachovaným parametrem ozubení by byla osová vzdálenost. Nespornou výhodou této konfigurace je možnost měnit parametry ozubení. Na této konfiguraci je také možné pozorovat vzájemnou interakci dvou plastových ozubených kol. Největším nedostatkem je 3D tištěná hřídel. Rozměry pastorku vyžadují, aby byl součástí hřídele, to ale značně komplikuje výrobu. Pro nejkvalitnější pastorek je nutné, aby osa pastorku byla ve směru osy Z. Tato orientace ale vyústí v hřídel, která má vrstvy kolmo na osu. Hřídel je namáhána primárně v krutu, a tak bude smýkána právě na rozhraní vrstev, kde 3D tištěné součásti vykazují nejmenší pevnost. Částečným řešením může být odchýlení osy hřídele od osy Z. Nejběžnější je odchýlení o 45°. Tím je eliminováno nevhodné zatížení hřídele a zároveň je dosaženo přijatelné kvality ozubení. Ačkoliv se touto orientací vyřeší problém s nevhodným zatížením, zvýší se významně spotřeba materiálu kvůli potřebě podpor, protože většina hřídele je tisknuta ve vzduchu.



Obrázek 19: Uložení a zajištění ložisek

11.3. Mazání převodovky

Převodovka byla původně navržena pro ocelové ozubení mazané olejem. Hřídele byly uloženy v kuželíkových ložiscích, která byla mazána olejovým filmem od ozubení. Hřídel s pastorkem je uložena v ložisku 30205 a hřídel s ozubeným kolem v ložisku 30206. Plastová kola se zpravidla testují i provozují na sucho, a tak budou testována i v této převodovce. Ložiska by byla provozována také na sucho, a proto budou původní kuželíková ložiska nahrazena ložisky s těsněním a plastickým mazivem. Kuželíková ložiska nejsou dodávána s plastickým mazivem, ale malé zatížení v důsledku malé únosnosti plastových kol umožňuje použití kuličkových ložisek, které se běžně dodávají s plastickým mazivem.



Obrázek 20: Model převodovky

Velikost kuličkových ložisek byla zvolena tak, aby ložiska měla stejné zástavbové rozměry. Menší tloušťka kuličkových ložisek bude kompenzována 3D tištěnou distanční trubkou. Na hřídel s pastorkem byla vybrána ložiska 6205-2RSH a na hřídel s ozubeným kolem ložiska 6206-2RS1.

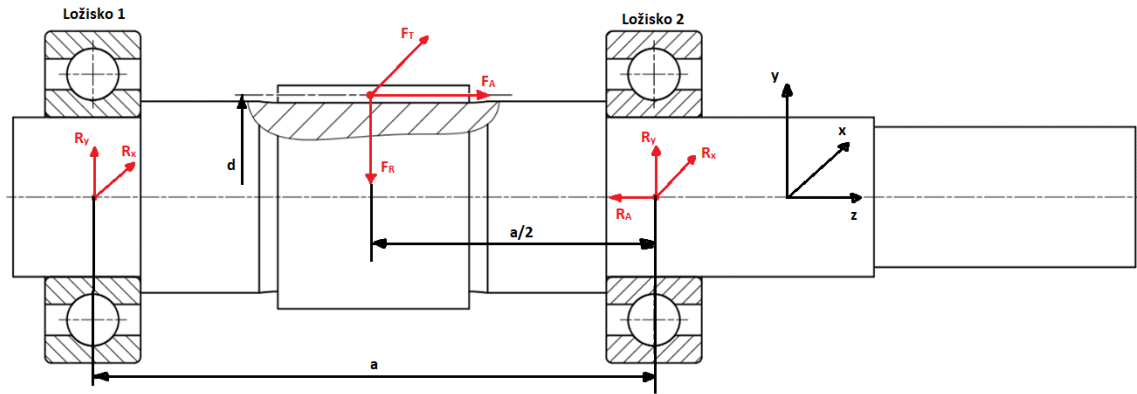
11.4. Kontrola únosnosti ložisek

Protože byla vyměněna původní ložiska, je nutné zkontrolovat únosnost nových ložisek. Z pevnostní kontroly ozubení (Tabulka 8) byly vybrány největší síly v ozubení a ty byly použity při kontrole ložisek (Tabulka 10).

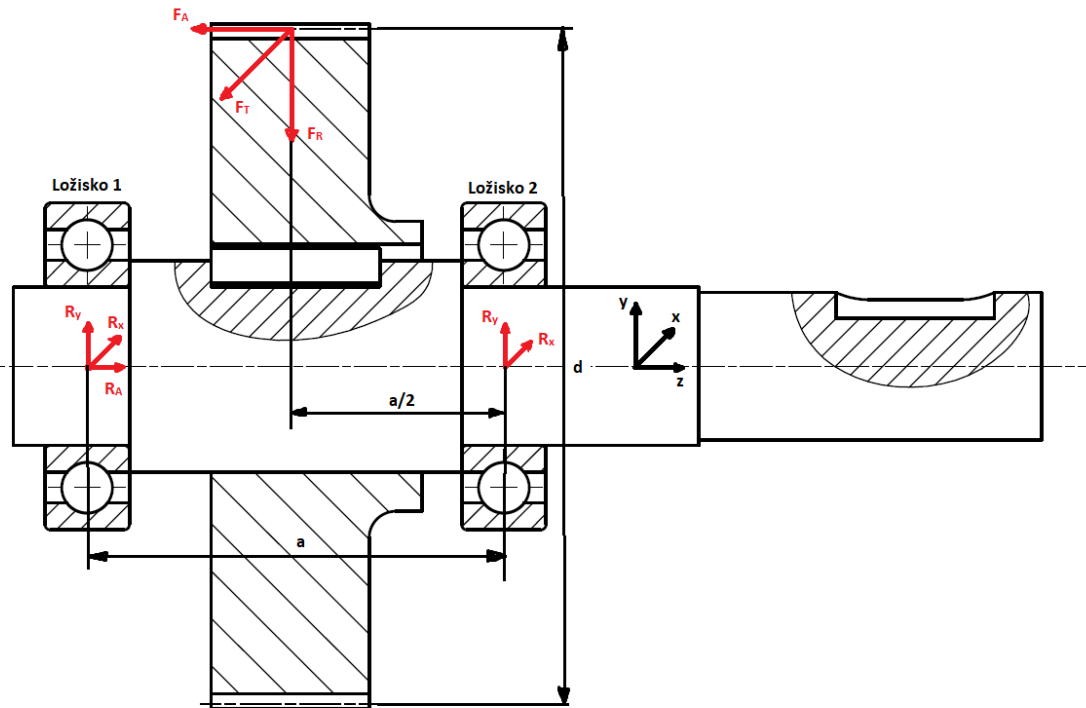
Tabulka 10: Vstupy do kontroly ložisek

F_R	94,2 N		vstupní hřídel	výstupní hřídel
F_T	250 N	a	88 mm	79 mm
F_A	53,1 N	d	32 mm	128 mm

Tyto síly byly použity k určení reakcí v ložiskách.



Obrázek 21: Uložení vstupní hřídele



Obrázek 22: Uložení výstupní hřídele

Řešení reakcí v ložiskách vychází z momentové rovnováhy v rovinách xz a yz a silové rovnováhy v ose z (Obrázek 21, Obrázek 22). Pro řešení reakcí v ložisku 1 se zapíše momentová rovnováha vůči ložisku 2 a naopak.

Ložisko 1

$$xz: R_x * a - F_T * \frac{a}{2} = 0 \quad (15)$$

$$yz: R_y * a - F_R * \frac{a}{2} - F_A * \frac{d}{2} = 0 \quad (16)$$

Ložisko 2

$$xz: R_x * a - F_T * \frac{a}{2} = 0 \quad (17)$$

$$yz: R_y * a - F_R * \frac{a}{2} + F_A * \frac{d}{2} = 0 \quad (18)$$

Axiální síla

$$z: R_A - F_A = 0 \quad (19)$$

Z momentových rovnováh jsou poté vyjádřeny reakce v ložiskách

Ložisko 1

$$R_x = \frac{F_T}{2} \quad (20)$$

$$R_y = \frac{F_R}{2} + F_A * \frac{d}{2*a} \quad (21)$$

Ložisko 2

$$R_x = \frac{F_T}{2} \quad (22)$$

$$R_y = \frac{F_R}{2} - F_A * \frac{d}{2*a} \quad (23)$$

Axiální síla

$$R_z = F_A \quad (24)$$

po dosazení pomocí Pythagorovy věty sečteme reakce v rovinách xz a yz abychom získali výslednou radiální reakci v ložisku.

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (25)$$

Tabulka 11: Reakce v ložiskách

		vstupní hřídel	výstupní hřídel
ložisko 1	R _A [N]	0	53,1
	R _x [N]	125	125
	R _y [N]	56,7	4
	R [N]	137,2	125,1
ložisko 2	R _A [N]	53,1	0
	R _x [N]	125	125
	R _y [N]	37,4	90,1
	R [N]	130,4	154

Dále byla kontrolována pouze axiálně zatížená ložiska.

Z katalogu výrobce byly zjištěny parametry ložisek (Tabulka 12)

Tabulka 12: Parametry ložisek

	6205-2RSH (vstupní hřídel)	6206-2RS1 (výstupní hřídel)
C [N]	14 800	20 300
F_R (min) [N]	148	203
e	0,19	0,19
X	0,56	0,56
Y	2,3	2,3

Bylo určeno ekvivalentní zatížení podle vzorce

$$P = X * F_R + Y * F_A \quad (26)$$

Tabulka 13: Ekvivalentní zatížení ložisek

	6205-2RSH (vstupní hřídel)	6206-2RS1 (výstupní hřídel)
P [N]	195	192
n [min^{-1}]	1000	250

a životnost ložisek podle vzorce

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{P}\right)^p * \frac{10^6}{n*60} \quad (27)$$

Tabulka 14: Životnost ložisek

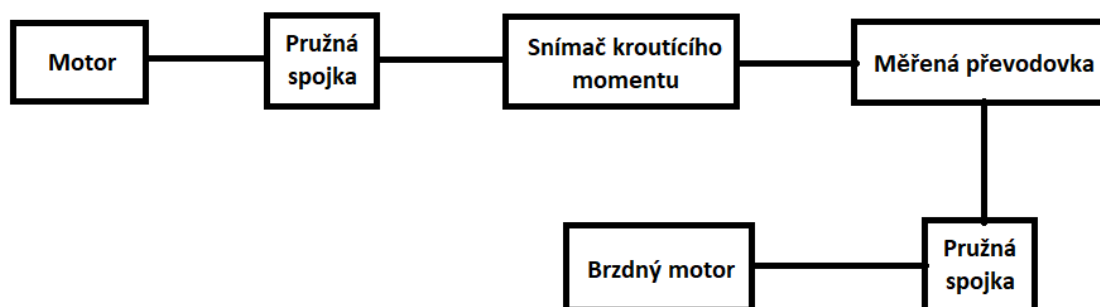
	6205-2RSH (vstupní hřídel)	6206-2RS1 (výstupní hřídel)
L_{10h} [h]	6 960 466	75 213 018

Kontrolou bylo ověřeno, že ložiska vyhovují z hlediska životnosti, ale hlediska minimálního zatížení nevyhovují. To pravděpodobně způsobí zkrácení životnosti ložisek. Ze životnosti je zřejmé, že ložiska jsou předdimenzována, ale v tomto případě jsou tato ložiska nezbytná, kvůli připojovacím rozměrům.

12. Návrh měřicího standu

Měřicí stand bude realizován formou otevřeného elektrického zatěžovacího okruhu (viz. Obrázek 23). Převodovka bude provozována do rychla, protože norma JIS B 1736 [43] doporučuje, aby byl pastorek testován při 1000 ot/min. Při zapojení převodovky do rychla bude možné využít šesti-pólový asynchronní motor zapojený do rozvodné sítě jako brzdu a jako pohon použít frekvenčně řízený asynchronní motor. Samotné měření bude prováděno snímačem kroutícího momentu na vstupní hřídeli. V kombinaci s otáčkami hnacího motoru bude možné určit zatížení obou ozubených kol převodovky. Aby nedocházelo k přenášení

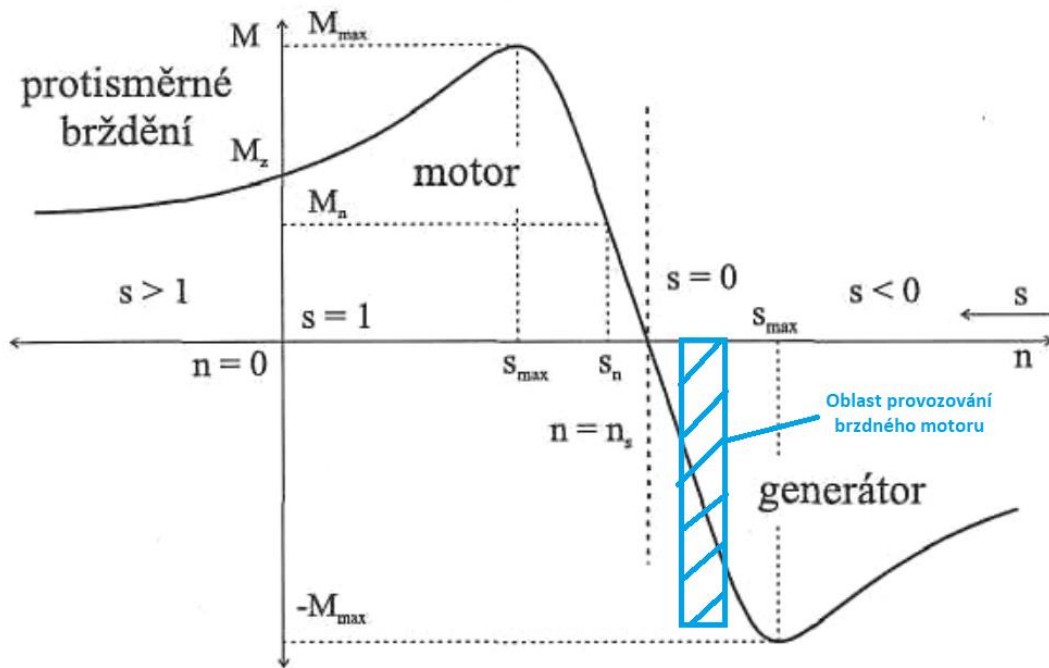
rázů a vibrací mezi motory a převodovkou, bude použita pružná spojka na vstupní i výstupní hřídeli převodovky.



Obrázek 23: Schéma měřícího standu

Nejdůležitějším prvkem měřícího standu je pohonná jednotka. Jak bylo řečeno, bude pro pohon měřícího okruhu použit frekvenčně řízený asynchronní motor. Otáčky vstupního hřídele převodovky se budou pohybovat mezi 250 a 300 ot/min a budou upravovány tak, aby bylo dosaženo požadovaného zatížení převodovky brzdným motorem (Obrázek 24). Vzhledem k tomu, že budou testována 3D tištěná kola, nejsou vysoké nároky na výkon motoru (Tabulka 15). Kvůli malým otáčkám vstupního hřídele byl zvolen 8-pólový motor velikosti 100L o výkonu 0,75 kW. Výkon byl zvolen tak, aby pokryl zatížení soukolí a mechanické ztráty v měřící trati. Velikost 100L s výškou osy 100 mm je výhodná, protože převodovka má výšku osy 95 mm. Chybějících 5 mm bude korigováno výpalkem z 5 mm plechu.

Použití asynchronního motoru jako brzdy vyžaduje provoz motoru v generátorové oblasti, tj. otáčky motoru musí být vyšší než synchronní otáčky (Obrázek 24).



Obrázek 24: Zobrazení provozní oblasti brzděného motoru v momentové charakteristice asynchronního motoru (z [44], upraveno)

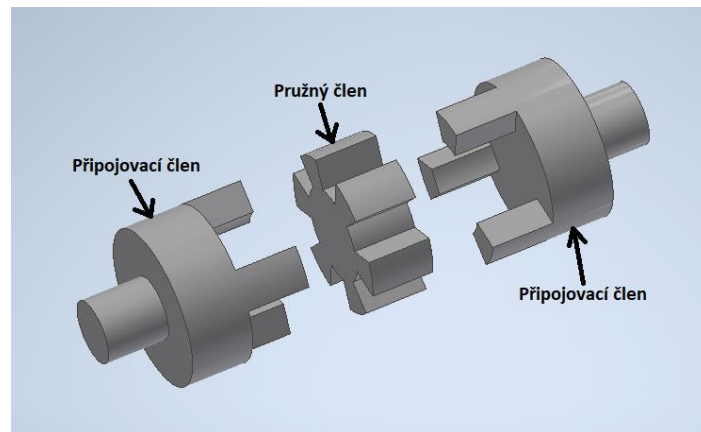
Brzdňý motor bude připojen přímo k rozvodné síti, aby se snížila cena měřicího standu a zjednodušilo se řízení, proto je na výběr 3000, 1500, 1000 a 750 otáček za minutu. Protože norma doporučuje testování při 1000 otáčkách pastorku za minutu, byl zvolen šestipólový motor. Celý stand je realizován ve výšce osy 100 mm, a proto byl vybrán motor velikosti 100L. Výkon motoru byl zvolen nejmenší dodávaný pro evropský trh ve velikosti 100L tj. 1,5kW. [45]

Tabulka 15: Tok výkonu měřicím standem při maximálním zatížení (geometrie 1 s nylonem)

	účinnost	moment [Nm]	otáčky [min^{-1}]	výkon [W]
motor	-	19,7	257	530
pružná spojka	0,95	18,7	257	503
snímač kroutícího momentu	1	18,7	257	503
pružná spojka	0,95	17,8	257	478
vstupní hřídel s ozubeným kolem	-	17,8	257	478
výstupní hřídel s pastorkem	0,9	4	1028	430
pružná spojka	0,95	3,8	1028	409
brzda	-	3,8	1028	409

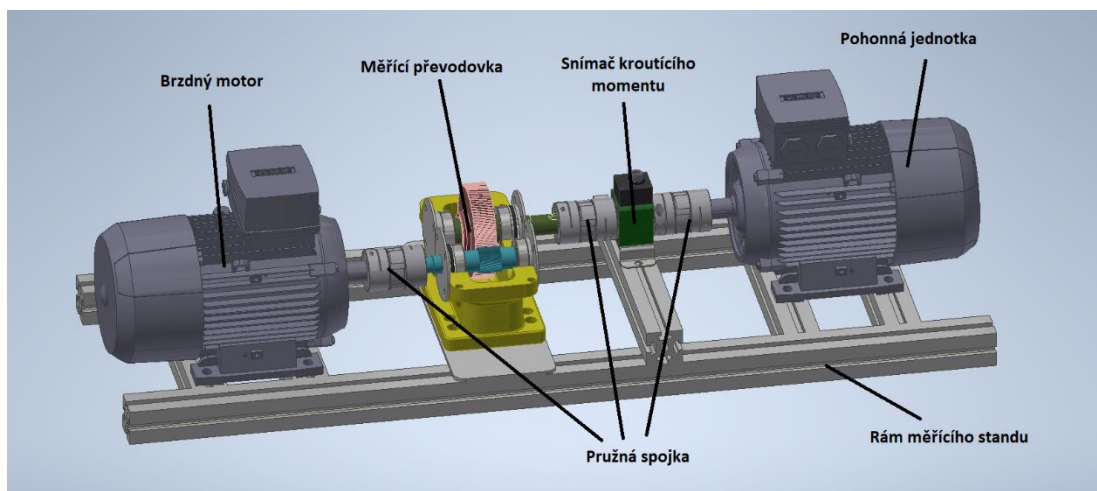
Mezi motory a převodovku bude umístěna pružná spojka, aby bylo zamezeno přenosu vibrací a aby byla vyrovnána nesouosost hřídelí. Průměr hřídelí obou motorů je 28

mm, průměr vstupní hřídele převodovky je 28 mm, průměr výstupní hřídele převodovky je 22 mm a průměr obou hřídelí snímače kroutícího momentu je 18 mm. Pro spojení výstupní hřídele a brzdy, motoru a snímače kroutícího momentu hřídelů a snímače kroutícího momentu a vstupní hřídele byla zvolena tzv. čelistová spojka. Čelistová spojka se skládá ze dvou připojovacích členů a pružného členu, který vyrovnává nesouososti a vibrace (viz Obrázek 25.)



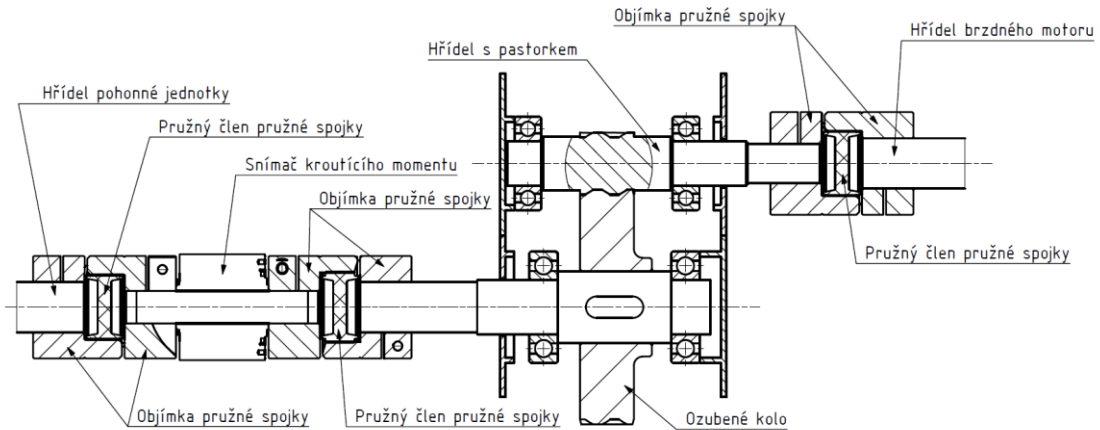
Obrázek 25 Konstrukce čelistové spojky

Byly vybrány čelistové spojky od firmy Ruland. Mezi motorem a snímačem kroutícího momentu bude spojka MJC57-28-A JD36/57-92Y MJC57-18-A a mezi výstupní hřídelí a brzdou bude spojka MJC57-28-A JD36/57-92Y MJC57-22-A. Všechny spojky jsou vyráběny se svěrným připojením na hřídel, které je dostatečně únosné pro výkony a momenty, které jsou očekávány v měřící trati. [46] [47] [48] [49]



Obrázek 26: Model měřící tratě

Kroutící moment bude měřen na vstupu pomocí rotačního snímače momentu o rozsahu 0÷100Nm od firmy Burster. Pomocí otáček pohonu a kroutícího momentu na vstupní hřídeli bude dopočítán výkon a z něj síly v ozubení. [50] [51]



Obrázek 27: Řez měřicí trať

Celá měřicí trať bude postavena na konstrukci z hliníkových profilů. Hliníkové profily byly zvoleny namísto svařované konstrukce, protože výkony a síly v měřicí trati budou relativně malé a tuhost svařované konstrukce není třeba, a bude využito jednoduché manipulace s hliníkovými profily.

Tabulka 16: Shrnutí měřicí tratě

	Výrobce	Model
Pohonná jednotka	Siemens	1LE1003-1AD42-2AA4
Pružné spojky	Ruland	MJC57-28-A JD36/57-92Y MJC57-18-A
		MJC57-28-A JD36/57-92Y MJC57-22-A
Snímač kroutícího momentu	Burster	8656
Brzdny motor	Siemens	1LE1003-1AC42-2AA4

13. Závěr

Cílem práce bylo upravit reálnou převodovku pro potřeby testování polymerových kol a následně navrhnout polymerová kola do upravené převodovky a metodiku jejich testování. Při návrhu se ukázalo, že část testování bude možné provést s minimálními úpravami původní převodovky. Hlavní úpravou byla výměna kuželíkových ložisek mazaných olejovým filmem za kuličková ložiska mazaná tukem. Pro testování parametrů tisku a materiálů byl ponechán ocelový pastorek a bylo testováno pouze polymerové ozubené kolo. Tato konfigurace se nejvíce blíží konfiguraci doporučené normami VDI 2736 a JIS B 1736. Pro testování různých geometrií byl nahrazen i pastorek se vstupní hřídelí. Všechny uvažované kombinace byly zkontrolovány dle normy VDI 2736 v programu KissSoft 2018 sp3. Před vlastním testováním by bylo vhodné provést navíc kontrolu poškození teplem, kterou norma VDI 2736 neprovádí. Z uvažovaných materiálů se jeví jako nejlepší nylon kvůli nejlepším mechanickým vlastnostem a výborné chemické odolnosti. Podle kontrol má nylonové soukolí nejlepší statickou únosnost a při životnosti 48 hodin je schopné přenášet největší výkon. Z uvažovaných geometrií ozubení je nejvhodnější geometrie s úhlem záběru 30° , modulem 1,25 a úhlem šroubovice 12° . Při zatížení má největší životnost z uvažovaných geometrií. Nejmenší skluz v ozubení (Příloha 4) by mohl znamenat, že tato geometrie bude vykazovat menší oteplení při provozu a tím pádem menší opotřebení vlivem oteplení. V příloze práce jsou kompletní protokoly kontrol ozubení z KissSoftu, 3D model převodovky a testovacího standu a technické listy kupovaných součástí testovacího standu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Význam
3D	tří dimenzionální
FFF	fused filament fabricaton
FDM	fused deposition modeling
UV	zkratka pro ultrafialové záření (z ang. „ultraviolet“)
SLA	stereolitografie
DLP	digital light processing
MSLA	masked stereolithography
LCD	liquid crystal display
d_t	průměr trysky [mm]
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
PLA	polylactic acid
PETG	Polyethylene terephthalate glykol
PA	polyamid
R_m	mez pevnosti [MPa]
σ_A	mez únavy
i	převod [-]
z	počet zubů [-]
M_k	kroucí moment [Nm]
η	účinnost
m_n	normálový modul ozubení [mm]
F_N	normálová síla [N]
F_T	tečná síla [N]
F_A	axiální síla [N]
F_R	radiální síla [N]
S_F	tloušťka paty zubu [mm]
h_F	výpočtová výška zubu [mm]
b	šířka věnce [mm]
σ_o	ohybové napětí [MPa]
α_n	úhel profilu [°]
α_w	valivý úhel [°]
α_{tw}	tečný valivý úhel [°]
β	úhel šroubovice [°]
d_w	valivý průměr [mm]
K_f	součinitel zatížení zubu [-]
Y_{Fa}	součinitel tvaru zubu [-]
Y_{Sa}	součinitel korekce zatížení [-]
Y_ϵ	součinitel záběru [-]
Y_β	součinitel šroubovice [-]
a	vzdálenost podpor [mm]
R_x	radiální reakce ve směru osy x [N]
R_y	radiální reakce ve směru osy y [N]
R	radiální reakce
R_a	axiální reakce
C	základní dynamická únosnost [N]
F_R	minimální zatížení [N]
e	poměr axiální a radiální reakce [-]
X	součinitel radiálního zatížení [-]
Y	součinitel axiálního zatížení [-]



P	ekvivalentní zatížení [N]
n	otáčky hřídele [min^{-1}]
L_{10h}	životnost v hodinách [hod]

Použitá literatura

- [1] S. B. Amit Bandyopadhyay, Additive Manufacturing, Second Edition, Boca Raton: CRC Press, 2020.
- [2] sharplayers, „Aditivní výroba, technologie, principy,“ [Online]. Available: <https://sharplayers.cz/support/aditivni-vyroba/>. [Přístup získán 16 říjen 2022].
- [3] HUBS, „What is SLA 3D printing?,“ [Online]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>. [Přístup získán 14 říjen 2022].
- [4] All3dp, „DLP vs LCD 3D Printer: The Main Differences,“ 5 červenec 2022. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/lcd-vs-dlp-3d-printing-technologies-compared/>. [Přístup získán 14 říjen 2022].
- [5] Sculpteo, „Layer Thickness: Precision of 3D Printing,“ [Online]. Available: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/layer-thickness-definition/>. [Přístup získán 30 říjen 2022].
- [6] P. 3D, „3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+,“ [Online]. Available: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/#specs>. [Přístup získán 30 říjen 2022].
- [7] V. Collazo, „FFF: NOZZLE SIZES DEMYSTIFIED,“ 3D Chimera, 29 srpen 2018. [Online]. Available: <https://3dchimera.com/blogs/connecting-the-dots/fff-nozzle-sizes-demystified>. [Přístup získán 30 říjen 2022].
- [8] P. Carrier, „3D Printer Print Speed Calculation: How to find the optimal speed for reliable and constant print quality,“ Dyze design, 10 červenec 2018. [Online]. Available: <https://dyzedesign.com/2018/07/3d-print-speed-calculation-find-optimal-speed/>. [Přístup získán 20 únor 2023].
- [9] J. O'Connell, „3D Printing Infill: The Basics for Optimal Results,“ All3DP, 24 únor 2022. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>. [Přístup získán 30 říjen 2022].
- [10] B. Goldschmidt, „Cura Guide to the Best Infill Patterns,“ All3DP, 10 říjen 2022. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>. [Přístup získán 30 říjen 2022].
- [11] P. 3D, „Infill patterns,“ [Online]. Available: https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130. [Přístup získán 30 říjen 2022].
- [12] T. M. Bros, „What is Infill in 3D Printing?,“ The Machine Bros, 31 srpen 2022. [Online]. Available: <https://themachinebros.com/what-is-infill-in-3d-printing/>. [Přístup získán 20 únor 2023].

- [13] F. Arceo, „Infill Patterns; Which is the Strongest one for 3D printing?“, 3D Solved, [Online]. Available: <https://3dsolved.com/infill-patterns-which-is-the-strongest-one-for-3d-printing/>. [Přístup získán 20 únor 2023].
- [14] P. Gharge, „Cura Gyroid Infill: All You Need to Know“, All3DP, 10 květen 2022. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/cura-gyroid-infill/>. [Přístup získán 30 říjen 2022].
- [15] T. Boissonneault, „Understanding the Gyroid Infill in 3D Printing“, Wevolver, 8 duben 2022. [Online]. Available: <https://www.wevolver.com/article/understanding-the-gyroid-infill-in-3d-printing>. [Přístup získán 30 říjen 2022].
- [16] C. Kitchen, „TESTING 3D printed INFILL PATTERNS for their STRENGTH“, YouTube, 27 červenec 2018. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=upELIOHmzHc>. [Přístup získán 10 květen 2023].
- [17] Z. Hay, „The Best 3D Printing Temperatures for PLA, TPU, ABS, PETG, Nylon“, All3DP, 31 březen 2022. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/the-best-printing-temperature-for-different-filaments/>. [Přístup získán 4 listopad 2022].
- [18] E. Sommer, „The Best PLA Bed & Print Temperature Settings“, All3DP, 9 leden 2022. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/the-best-pla-print-temperature-how-to-achieve-it/>. [Přístup získán 4 listopad 2022].
- [19] B. O'Neill, „PLA bed temperature & print temperature settings“, Wevolver, 20 březen 2022. [Online]. Available: <https://www.wevolver.com/article/pla-bed-temperature-print-temperature-settings>. [Přístup získán 4 listopad 2022].
- [20] Matmatch, „Filaments for Fused Deposition Modeling (FDM)“, [Online]. Available: <https://matmatch.com/learn/material/filaments-for-fused-deposition-modeling-fdm>. [Přístup získán 6 listopad 2022].
- [21] Simplify3D, „Ultimate Materials Guide - Tips for 3D Printing with ABS“, [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/abs/>. [Přístup získán 6 listopad 2022].
- [22] C. V., „All you need to know about ABS for 3D printing“, 3D natives, 6 červen 2019. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/abs-3d-printing-060620194/#!>. [Přístup získán 6 listopad 2022].
- [23] P. Gharge, „Printing with ABS – 6 Simple Tips to Succeed“, All3DP, 19 leden 2022. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/printing-with-abs-tips-tricks/>. [Přístup získán 6 listopad 2022].
- [24] B. O'Neill, „ABS smoothing: Acetone vapor baths & other ways to remove layer lines“, Wevolver, 15 září 2022. [Online]. Available: <https://www.wevolver.com/article/abs-smoothing-acetone-vapor-baths-other-ways-to-remove-layer-lines>. [Přístup získán 6 listopad 2022].
- [25] Simplify3D, „Filament Properties Table“, [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/>. [Přístup získán 20 únor 2023].

- [26] M. M. Padzi, „Fatigue Characteristics of 3D Printed Acrylonitrile,“ *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 22-24 September 2017.
- [27] k. m. plastics, „ABS Chemical Resistance,“ [Online]. Available: http://k-mac-plastics.com/data-sheets/abs_chemical_resistance.htm. [Přístup získán 10 květen 2023].
- [28] TWI, „WHAT IS PLA? (EVERYTHING YOU NEED TO KNOW),“ [Online]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pla>. [Přístup získán 6 listopad 2022].
- [29] J. O'Connell, „PLA Plastic / Material – The Ultimate Guide,“ All3DP, 24 červenec 2021. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>. [Přístup získán 6 listopad 2022].
- [30] Simplify3D, „Ultimate Materials Guide - Tips for 3D Printing with PLA,“ [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pla/>. [Přístup získán 6 listopad 2022].
- [31] L. S. O.H. Ezeh, „Fatigue strength of additively manufactured polylactide (PLA): effect of,“ *International Journal of Fatigue*, 15 květen 2019.
- [32] R. Toor, „Chemical Resistance of 3D Printing Filament,“ 24 duben 2022. [Online]. Available: <https://www.filamentive.com/chemical-resistance-of-3d-printing-filament/>. [Přístup získán 10 květen 2023].
- [33] C. V, „All you need to know about PETG for 3D printing,“ 3D natives, 18 prosinec 2019. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/petg-3d-printing-guide-181220194/>. [Přístup získán 20 únor 2023].
- [34] MakerBot, „EVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT PETG 3D PRINTING,“ [Online]. Available: <https://www.makerbot.com/stories/engineering/everything-you-need-to-know-about-petg-3d-printing/>. [Přístup získán 20 únor 2023].
- [35] Tractus3D, „PETG material,“ [Online]. Available: <https://tractus3d.com/materials/petg/>. [Přístup získán 20 únor 2023].
- [36] S. J. Grzegorz Dolzyk, „Tensile and Fatigue Analysis of 3D-Printed Polyethylene,“ 26 březen 2019.
- [37] All3DP, „Nylon 3D Printing – The Ultimate Guide,“ 7 květen 2023. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/nylon-3d-printing-how-to-get-nylon-3d-printed/>. [Přístup získán 10 květen 2023].
- [38] „EVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT NYLON 3D PRINTINGEVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT NYLON 3D PRINTING,“ [Online]. Available: <https://www.makerbot.com/stories/design/nylon-3d-printing/>. [Přístup získán 10 květen 2023].
- [39] G. S. S. D. Y. A. A. T. D. T. Andrey Yankin, „Optimization of Fatigue Performance of FDM ABS and Nylon,“ *micromachines*, p. 14, 24 leden 2023.

- [40] Martin, „SLA Resin Types | Pros, Cons & How to Choose,“ The 3D printer bee, [Online]. Available: <https://the3dprinterbee.com/sla-resin-types/>. [Přístup získán 6 listopad 2022].
- [41] HUBS, „What’s the right resin for SLA? 3D printing materials compared,“ [Online]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/sla-3d-printing-materials-compared/>. [Přístup získán 6 listopad 2022].
- [42] P. Ing. Jan Kanaval, *Přednášky ČMS2*, Praha: ČVUT, 2023.
- [43] U. K. Inho Bae, „Comparison of strength ratings of plastic gears by VDI 2736 and JIS B 1759,“ 15 prosinec 2022. [Online]. Available: <https://gearsolutions.com/features/comparison-of-strength-ratings-of-plastic-gears-by-vdi-2736-and-jis-b-1759/>. [Přístup získán 13 květen 2023].
- [44] S. Kocman, *Asynchronní stroje*, Ostrava: VŠB - Technická Univerzita v Ostravě, 2002.
- [45] Siemens, „Motor configurator,“ [Online]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/spice/pcmplus/app/>. [Přístup získán 26 květen 2023].
- [46] Ruland, „MJC57-18-A,“ [Online]. Available: https://www.ruland.com/md_productpdf/index/generate/product/4693/sku/MJC57-18-A/store/1/. [Přístup získán 26 květen 2023].
- [47] Ruland, „JD36/57-92Y,“ [Online]. Available: https://www.ruland.com/md_productpdf/index/generate/product/4879/sku/JD36-57-92Y/store/1/. [Přístup získán 26 květen 2023].
- [48] Ruland, „MJC57-28-A,“ [Online]. Available: https://www.ruland.com/md_productpdf/index/generate/product/4699/sku/MJC57-28-A/store/1/. [Přístup získán 26 květen 2023].
- [49] Ruland, „MJC57-22-A,“ [Online]. Available: https://www.ruland.com/md_productpdf/index/generate/product/4696/sku/MJC57-22-A/store/1/. [Přístup získán 26 květen 2023].
- [50] burster, „8656,“ [Online]. Available: https://www.burster.com/fileadmin/user_upload/redaktion/Documents/Products/Data-Sheets/Section_8/8656_EN.pdf. [Přístup získán 26 květen 2023].
- [51] t. parts, „Precision Torque sensor 8656 rotary, non-contact transfer, short design,“ [Online]. Available: <https://www.traceparts.com/en/product/burster-precision-torque-sensor-8656-rotary-noncontact-transfer-short-design?CatalogPath=BURSTER%3ABURSTER.3.3&Product=32-22092020-105051>. [Přístup získán 26 květen 2023].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Upravovaná převodovka	2
Obrázek 2: Staircase efekt (skutečný tvar – černě, velká výška vrstvy – červeně, malá výška vrstvy – zeleně)	5
Obrázek 3: Tvar vrstvy v závislosti na výšce vrstvy (příliš velká výška vrstvy – vlevo, ideální výška vrstvy – uprostřed, minimální výška vrstvy – vpravo) [8]	6
Obrázek 4: Typy dvourozměrných výplní [12]	7
Obrázek 5: Typy trojrozměrných výplní [13]	8
Obrázek 6: Srovnání výplní (data z [16], upraveno).....	9
Obrázek 7: Princip kontroly zubu na ohyb (z [42], upraveno)	16
Obrázek 8: Upravené soukolí pro statický test.....	17
Obrázek 9: Testovací vzorek pro statický test	18
Obrázek 10: Páka pro blokování a zatěžování převodovky	18
Obrázek 11: Konfigurace statického testu.....	19
Obrázek 12: Ukázka kola s variabilní výplní (z programu PrushaSlicer).....	21
Obrázek 13: Podoba vyplnění zubů kola (z programu PrushaSlicer)	21
Obrázek 14: Síly v ozubení.....	27
Obrázek 15: Model ozubeného kola.....	29
Obrázek 16: Model hřídele s pastorkem	29
Obrázek 17: Spojení ozubeného kola se hřídelí.....	30
Obrázek 18: Foto upravované převodovky.....	31
Obrázek 19: Uložení a zajištění ložisek	33
Obrázek 20: Model převodovky	34
Obrázek 21: Uložení vstupní hřídele.....	35
Obrázek 22: Uložení výstupní hřídele.....	35
Obrázek 23: Schéma měřicího standu	38
Obrázek 24: Zobrazení provozní oblasti brzděného motoru v momentové charakteristice asynchronního motoru (z [44], upraveno)	39
Obrázek 25 Konstrukce čelistové spojky	40
Obrázek 26: Model měřicí tratě.....	40
Obrázek 27: Řez měřicí tratí	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání materiálů.....	13
Tabulka 2: Normalizované moduly ozubení dle ČSN 01 4608 (tučně doporučené hodnoty)	15
Tabulka 3: Srovnání délek tisku a spotřeby materiálu při různých hustotách výplně	20
Tabulka 4: Soupis testovacích vzorků	22
Tabulka 5: Shrnutí testovaných geometrií ozubení	23
Tabulka 6: Výsledky kontroly ozubení pro testované materiály (Příloha 4)	26
Tabulka 7: Výsledky kontroly ozubení pro testované geometrie ozubení (Příloha 4)	26
Tabulka 8: Síly v ozubení pro různé geometrie.....	27
Tabulka 9: Parametry testované převodovky	31
Tabulka 10: Vstupy do kontroly ložisek	34
Tabulka 11: Reakce v ložiskách	36
Tabulka 12: Parametry ložisek	37
Tabulka 13: Ekvivalentní zatížení ložisek	37
Tabulka 14: Životnost ložisek.....	37
Tabulka 15: Tok výkonu měřícím standem při maximálním zatížení (geometrie 1 s nylonem)	39
Tabulka 16: Shrnutí měřící tratě	41

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Výrobní výkres 3D tištěného kola
- Příloha 2: Výrobní výkres 3D tištěné hřídele s pastorkem
- Příloha 3: Výkres sestavy měřicí tratě
- Příloha 4: Protokoly o kontrole ozubení v programu KissSoft
- Příloha 5: Technické listy nakupovaných součástí měřicí tratě