

Vliv povrchových úprav na díly vyrobené 3D tiskem a jejich funkčnost v mechanismu

Adam Píš

Bakalářská práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Adam Piš
Osobní číslo:	T19233
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv povrchových úprav na díly vyrobené 3D tiskem a jejich funkčnost v mechanismu

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Vytvořte funkční model mechanismu metodou 3D tisku.
3. Na vybrané díly aplikujte povrchové úpravy a sledujte chování v mechanismu.
4. Vyhodnoťte získané výsledky.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. GIBSON, I., David ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Second edition. New York: Springer,
2. BRYDEN, Douglas. CAD and rapid prototyping for product design. London: Laurence King Publishing, 2014, 176 s. Portfolio skills. Product design. ISBN 978-1-78067-342-4.
3. Dizon, J.R.C., 2018. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. Additive Manufacturing. doi:10.1016/j.addma.2017.12.002
4. DESHMUKH, Kalim, SADASIVUNI, Kumar Kishor a Mariam AIAli ALMAADEED, ed. 3D and 4D printing of polymer nanocomposite materials: processes, applications, and challenges. Amsterdam: Elsevier, [2020], xvii, 573 s. ISBN 978-0-12-816805-9.
5. KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. Začínáme s 3D tiskem. Brno: Computer Press, 2017, 211 s. ISBN 9788025148761.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Janošík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 24. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce je porovnanie vplyvu rôznych povrchových úprav, ktoré boli vykonané na dieloch vytvorených procesom 3D tlače, konkrétne procesom FLM. Bol vytvorený testovací mechanizmus na báze planetárneho prevodového systému. Medzi povrchové úpravy, ktoré boli v tejto práci vykonané, patria pieskovanie a leptanie. Taktiež bol študovaný vplyv tolerancie medzi jednotlivými ozubenými kolesami na mieru opotrebenia. Hlavnou veličinou pri vyjadrovaní opotrebenia bola stratená hmotnosť. Namerané hodnoty boli následne štatisticky spracované. Z nameraných dát je možné určiť, že nie všetky povrchové úpravy redukujú opotrebenie. Leptanie na krátku dobu môže telesá oslabiť a zrýchliť ich opotrebenie. Dlhšie časy leptania sa vyznačovali drastickou redukciou miery opotrebenia.

Kľúčové slová: Aditívna technológia, FLM, PLA, CPE, ABS, opotrebenie, povrchové úpravy, pieskovanie, acetónové leptanie

ABSTRACT

The main goal of this bachelor thesis is to compare the impact of different methods of surface finish, which were used to modify parts created using additive technology, specifically FLM processes. Testing mechanism was designed and built on the basis of planetary gear system. Two of the methods used for surface finishing were sand blasting and vapour smoothing. One of the studied components was also the wear caused by backlash between individual gears in the gear train. The main studied element to quantify wear in the system was lost mass. Measured data was statistically analyzed. It is possible to determine from the obtained data, that not every surface finish operation can yield reduction in wear. Using too short of an interval for vapour smoothing can weaken the object and increase wear rate. Longer smoothing times resulted in drastic reduction in wear.

Keywords: Additive technology, FLM, PLA, CPE, ABS, wear, surface finish, sand blasting, acetone smoothing

Rád by som touto cestou poďakoval vedúcemu bakalárskej práce, Ing. Václavovi Janoščíkovi, Ph.D., za pomoc a odborné vedenie pri písaní a realizovaní tejto práce. Taktiež by som rád poďakoval pánovi Ing. Vojtěchovi Šenkeříkovi, Ph.D. za pomoc v laboratóriu pri obsluhu 3D tlačiarňí.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia bakalárskej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAG sú totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČASŤ	10
1 ADITÍVNA TECHNOLOGIA	11
1.1 HISTÓRIA	11
1.2 TYPY ADITÍVNEJ TECHNOLOGIE	13
1.2.1 FLM (Fused Layer Modeling)	13
1.2.2 SLA (Stereolithography)	15
1.2.3 SLS (Selective Laser Sintering)	17
2 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V ADITÍVNEJ TECHNOLOGII.....	20
2.1 ABS (AKRYLONITRILBUTADIÉNSTYRÉN)	20
2.2 PLA (Kyselina polylaktónová)	21
2.3 PET (POLYETYLÉNTEREFTALÁT)	21
2.4 PC (POLYKARBONÁT)	22
2.5 NYLON (POLYAMID 6).....	23
2.6 MATERIÁLY PLNENÉ VLÁKNAMI.....	23
3 PREVODOVÉ MECHANIZMY	25
3.1 PLANETÁRNY PREVOD	25
3.2 ČELNÝ PREVOD	26
3.3 KUŽEĽOVÝ PREVOD.....	27
3.4 ZÁVITKOVÝ (ŠNEKOVÝ) PREVOD.....	27
4 POVRCHOVÉ ÚPRAVY	29
4.1 OBRUSOVANIE BRÚSNYM PAPIEROM	29
4.2 PIESKOVANIE	30
4.3 HLADENIE ACETÓNOVÝMI PARAMI.....	30
4.4 ŽIHANIE.....	31
5 OPOTREBENIE.....	33
5.1 TRIBOLÓGIA	33
5.2 ABRAZÍVNE OPOTREBENIE.....	33
5.3 ADHEZÍVNE OPOTREBENIE.....	34
5.4 EROZÍVNE OPOTREBENIE	35
5.5 KOROZÍVNE OPOTREBENIE	35
5.6 ÚNAVOVÉ OPOTREBENIE	36
5.7 KAVITAČNÉ OPOTREBENIE	37
II PRAKTICKÁ ČASŤ.....	38

6	NÁVRH A CIELE EXPERIMENTU	39
6.1	CAD NÁVRH	39
6.2	POUŽITÉ MATERIÁLY	40
6.2.1	Nefunkčné súčiastky	41
6.2.2	Funkčné súčiastky	41
6.2.3	Merané súčiastky	42
6.3	OVLÁDANIE MECHANIZMU	43
7	POVRCHOVÉ ÚPRAVY MERANÝCH OZUBENÝCH KOLIES.....	45
7.1	ŽIADNE POVRCHOVÉ ÚPRAVY.....	45
7.2	PIESKOVANIE	46
7.3	LEPTANIE	47
8	ŠTATICCKÉ SPRACOVANIE.....	49
8.1	ARITMETICKÝ PRIEMER	49
8.2	SMERODAJNÁ ODCHÝLKA.....	49
8.3	MEDIÁN	49
8.4	LINEÁRNA REGRESIA	50
9	MERANIE OPOTREBENIA	51
9.1	VLASTNOSTI MERANIA	51
9.2	MIERA OPOTREBENIA V ZÁVISLOSTI OD MATERIÁLOV FUNKČNÝCH PRVKOV PRE POVRCHOVO NEUPRAVENÉ VZORKY	52
9.2.1	PLA	53
9.2.2	CPE	55
9.3	OPOTREBENIE PIESKOVANÝCH VZORIEK.....	58
9.4	OPOTREBENIE LEPTANÝCH VZORIEK	61
9.4.1	Zmena hmotnosti v závislosti na čase leptania	61
9.4.2	Opotrebenie vzoriek leptaných 5 sekúnd	62
9.4.3	Opotrebenie vzoriek leptaných 10 sekúnd	65
9.4.4	Opotrebenie vzoriek leptaných 15 sekúnd	67
9.5	CELKOVÝ ČAS MERANIA A PRÍPRAVY PRAKTICKEJ ČASTI	69
10	DISKUSIA VÝSLEDKOV	71
	ZÁVER	72
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....	73
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	78
	ZOZNAM OBRÁZKOV	80
	ZOZNAM TABULIEK	82
	ZOZNAM GRAFOV	83
	ZOZNAM PRÍLOH.....	84

ÚVOD

Od 80. rokov 20. storočia, aditívna technológia prenikala do sveta výroby. Keď technológia na báze stavby výrobku pomocou jednotlivých vrstiev vznikla, bol jej daný názov Rapídne prototypovanie. Táto technológia nedokázala vyrobiť nič iné, iba lepkavé a krehké výrobky, ktoré mohli byť použité výhradne ako prototypy. Samotný proces nebol rýchly, ale aj napriek tomu dokázal cenovo konkurovať konvenčným technológiám. Počiatočným procesom aditívnej výroby bola stereolitografia, ktorá využívala fotopolymerizáciu. Neskôr vznikli ďalšie technológie, ktoré boli taktiež zahrnuté do pojmu aditívna technológia a všetky využívali materiály na báze plastov. Na prelome tisícročí boli vyvinuté procesy, ktoré dokázali vyrobiť výrobky z kovu. Tento pokrok zmenil hlavné zameranie aditívnej technológie z výroby prototypov na výrobu finálnych výrobkov. V dnešnej dobe je využívaný široký rozsah materiálov, napr. plasty, keramické materiály, ale aj potravinové materiály, lieky a ľudské tkanivá. Aditívna technológia sa aj naďalej prudko rozvíja, a to rýchlejšie, ako ktorákoľvek výrobná technológia v minulosti. [1]

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 ADITÍVNA TECHNOLOGIA

Pojem aditívna technológia je všeobecné pomenovanie všetkých výrobných procesov, pri ktorých vznikajú jednotlivé výrobky individuálnym vyrábaním a spájaním objemových elementov, tzv. voxelov. Tieto objemové elementy sa skladajú z vrstiev s rovnakou hrúbkou. [1]

Tento názov ale postupne nahradzuje jednoduchšie a konkrétnejšie pomenovanie „3D tlač“. [1]

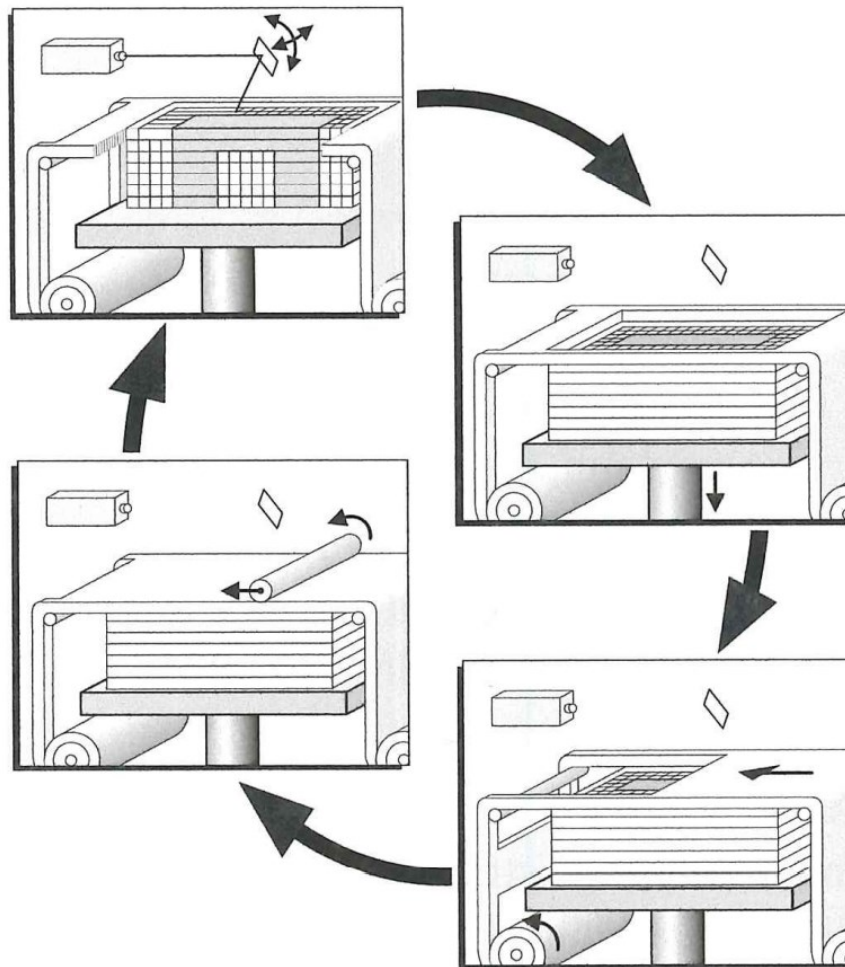
Základom výroby výrobku aditívnou technológiou je 3D model. Ako jedna z najväčších výhod tejto technológie je, že nie je dôležité, ako daný model vznikol, či už konvenčným modelovaním alebo napr. skenovaním. [1] Pokiaľ popisuje určitý objem v priestore, dá sa použiť na výrobu 3D tlačeného výrobku. [4] Zaužívaným štandardom pre vyjadrenie objemového priestoru v aditívnej technológii je formát .STL (Standard Transformation Language). [1]

Daný model sa prevedie do softvéru, ktorý pripravuje modely na tlač, taktiež nazývaný slicer. Po zadaní základných parametrov, ako je hrúbka vrstvy, rýchlosť tlače apod. sa spustí matematický proces na vytvorenie jednotlivých priereзов, tzv. „krájanie“ (slicing). Výsledkom tohto procesu je 3D model rozdelený na veľký počet tenkých vrstiev. [1]

1.1 História

Do roku 1980 mala technológia 3D tlače minimálne uplatnenie vo výrobe s výnimkou elektrotechnického priemyslu, kde sa používala na výrobu mikroprocesorov. Zložitejšie patenty sa však začali objavovať ku koncu 80. rokov, medzi nimi aj patent od vynálezcu Charlesa Hulla, ktorý objavil metódu stereolitografie (SLA). Tento proces je založený na tvrdnutí tekutého polyméru pri vystavení ultrafialovému svetlu. Ako prvý výrobok vyrobený touto technológiou bol plastový pohárik vysoký 5 cm. Celý proces výroby však trval 2 mesiace. [2]

Postupne sa začali objavovať aj nové procesy aditívnej technológie, ako napríklad Laminated Object Manufacturing (LOM). Ten bol založený na báze priereзов, ktoré boli najskôr vyrezané laserom a následne bola na jednu stranu nanosená tenká vrstva polyméru. Táto technológia ale úspešná nebola a postupne ju nahradili iné typy 3D tlače. [2]



Obr. 1: Princíp LOM tlače [1]

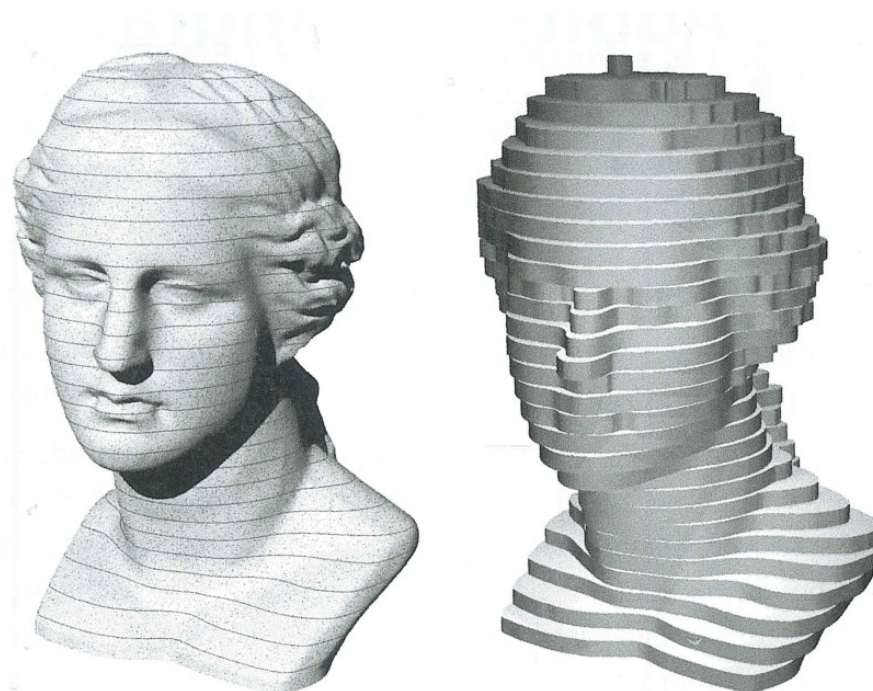
Ďalšie vyvinuté technológie zahŕňali Selective Laser Sintering (SLS) v roku 1989 a Fusion Deposition Modeling (FDM) v roku 1992. Vďaka FDM vznikol v roku 2005 projekt RepRap (Replicating Rapid Prototyping) od profesora Adriana Bowyera. RepRap tlačiareň pozostávala z 3-osového robota na báze extrúzie pomocou filamentu. Celý projekt bol „open-source“ využívajúci Arduino mikropočítač a bol primárne zameraný na nadšencov tejto novej technológie. [2]

Na základe tohto projektu bola v roku 2006 založená spoločnosť MakerBot Industries, ktorá poskytovala stavebnice na zostavenie 3D tlačiarne pre hocikoho so základnou technickou zručnosťou. [2]

Pravá revolúcia ale začala len pár rokov dozadu, keď vyšlo z platnosti vyše 20 000 patentov týkajúcich sa 3D tlače od polovice 80. rokov 20. storočia. Nové materiály sa začali testovať, vrátane kovov, keramiky, živíc alebo napr. čokolády. Existujúce aditívne technológie sa neustále zlepšujú a zdokonaľujú do dnešného dňa. [2]

1.2 Typy aditívnej technológie

Všetky typy aditívnej technológie fungujú na rovnakom princípe, a to spájaním individuálnych vrstiev materiálu. Vrstvy sú tvarované na stavebnej podložke na rovine x-y. Tretí rozmer výrobok naberá naskladaním jednotlivých vrstiev na seba, v smere súradnice z. Všeobecne platí, že čím nižšia hrúbka vrstvy, tým je model presnejší a hladší. Kvôli tejto vlastnosti majú výrobky vytvorené aditívnou technológiou rôznu presnosť v smere x-y a inú v smere z. [1]



Obr. 2: Rozdelenie 3D výrobku na vrstvy o rovnakej hrúbke [1]

1.2.1 FLM (Fused Layer Modeling)

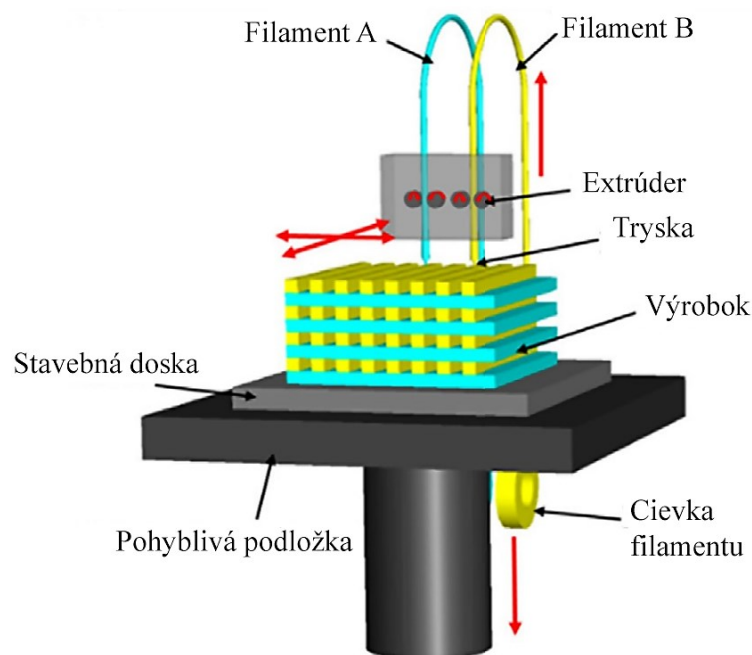
Taktiež známe pod menom 3D extrúzia alebo FDM (Fused Deposition Modeling). [1]

Technológia FLM sa najčastejšie spája s použitím termoplastických polymérov vo forme tlačovej struny, tzv. filamentu, ale aj zahrňuje aj materiály vo forme pást alebo pien, ktoré sú fyzikálne alebo chemicky pripravované z jednoduchých tuhých materiálov. [3]

Celý proces funguje na báze roztavenia materiálu do polorozpustného stavu, vytlačením na stavebnú dosku a nasledovným ochladením späť do tuhého stavu. Po vytlačení prvej vrstvy na stavebnú dosku sa tlačiacia tryska posunie smerom nahor, alebo sa stavebná doska posunie smerom nadol. Následne sa celý proces ukladania materiálu opakuje znovu. [3]

Výroba filamentu je jednou z najt'azších úloh v FLM technológií. Sú od nich požadované vlastnosti ako nízka viskozita a presný priemer struny, aby sa zaistil konštantný a presný tok polyméru. Navyše sa ešte od filamentu očakáva dobrý modul, aby sa pri tvorbe previsov nezdeformoval. Tieto reologické vlastnosti sa dosahujú pridávaním plastikačných činidiel počas výroby filamentu. [3]

Niektoré výrobky vyrábané touto technológiou vyžadujú tlačové podpory, ktoré musia byť po dokončení tlače odstránené. Existujú rôzne typy podpôr a ich odstránenie, napríklad odstrihnutie, odtrhnutie alebo použitie PVA podpôr, ktoré sú rozpustné vo vode. [1]



Obr. 3: Stavba FLM tlačiarne [3]

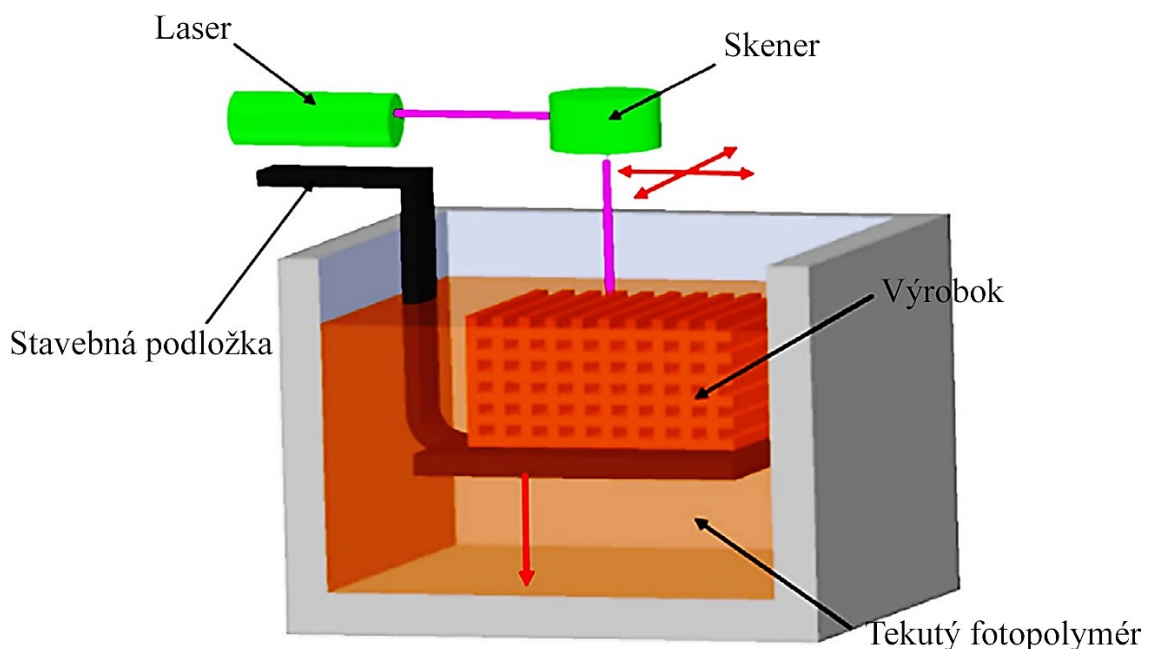
FLM je jednou z najrozšírenejších typov aditívnej technológie vďaka nízkej cene a širokej dostupnosti aj pre domácnosti. [3] Ďalšie výhody zahŕňujú takmer nulový odpad, použitie viacerých typov materiálov na tvorbu jedného produktu alebo jednotlivých vrstiev a jednoduchá stavba stroja. [1]

Medzi nevýhody patrí anizotropnosť vytlačeného materiálu, nedokonalá medzivrstvová príľnavosť, horšia drsnosť povrchu a nehomogénosť filamentu. Toto má za následok zhoršené mechanické vlastnosti výrobku v porovnaní s tradičnými technológiami ako napr. vstrekovanie. [3]

1.2.2 SLA (Stereolithography)

Všetky procesy, ktoré súvisia s tuhnutím kvapalín na vyrobenie daného výrobku sú založené na báze fotopolymerizácie. Tieto kvapaliny obsahujú tekutý monomér, v ktorom sa nachádza vhodný fotoinhibitor. Pri vystavení ultrafialovému svetlu sa spustí polymerizácia, počas ktorej prejde monomér z kvapalného na tuhý stav. [1] Na rozdiel od FLM, pri používaní SLA je nutné vykonať „dokončovacie spracovanie“ (post-processing). Toto následné spracovanie zahŕňa čistenie, napr. v izopropanole, a úplné vytvrdenie na ultrafialovom svetle. Dokončovacie práce nemožno zanedbať, a tak sú dôležitým krokom pri vytváraní komponentov pomocou SLA technológie. [4]

SLA technológia používajúca laser ako zdroj svetla je najstarším a najpodrobnejšie opísaným aditívnym procesom. [4] Tenký laserový lúč dostatočného výkonu na spustenie polymerizácie vytvára kontúry daného prierezu, v ktorom nastane lokálna polymerizácia a stvrdnutie monoméru. Stavebná podložka sa po vytvrdnutí posunie smerom nadol a ďalší prierez môže byť vytvorený. [1] Hrúbku vrstvy je možné kontrolovať pomocou rýchlosti lasera a jeho výkonu. Podobne ako pri technológii FLM, aj tu sú požadované podpory pri vytváraní určitého druhu geometrie.[4]

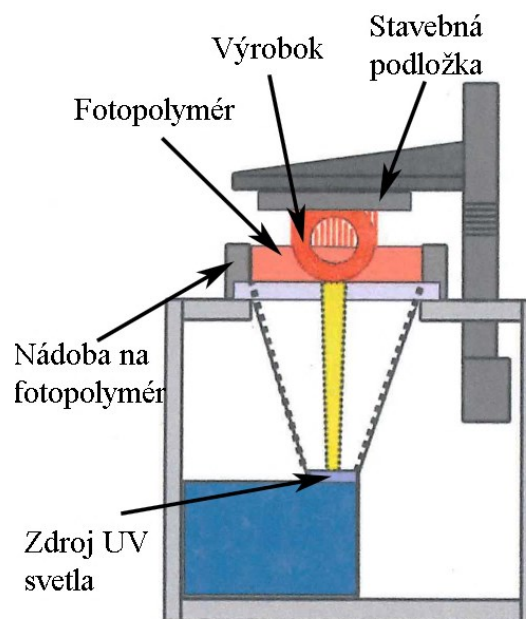


Obr. 4: Stavba SLA tlačiarne [3]

Ďalší zdroj svetla, ktorý sa môže používať na spustenie polymerizácie je projektor uložený v spodnej časti zariadenia vyžarujúci ultrafialové svetlo smerom nahor. Tento postup je taktiež nazývaný DLP (Digital Light Processing). Na rozdiel od laserovej SLA je celá vrstva

osvetlená a vytvrdnutá naraz. [4] Požadovaného tvaru prierezu dostaneme pomocou „masky“, ktorá je transparentná iba na miestach, kde má polymerizácia monoméru nastať [1]. Tieto masky sú vo forme čiernobielych obrázkov a sú zobrazované na tzv. DMD (Digital Mirroring Device). [3] Nad DMD je nádoba s transparentným dnom obsahujúca fotopolymér. Stavebná podložka je orientovaná smerom nadol. Pri vytváraní vrstvy sa podložka zastaví nad dnom podľa požadovanej hrúbky vrstvy. Po vytvrdnutí sa podložka posunie smerom nahor, kde sa vytvorí podtlak, ktorý prinúti fotopolymér vyplniť miesto, kde došlo k vytvrdnutiu predošlej vrstvy. [4]

Momentálne je SLA najpresnejšou aditívnou technológiou a limitácie sa týkajú hlavne strojov a ich veľkosti, nie priamo samotného procesu. SLA nám umožňuje výrobu dutých produktov pri vytvorení diery na vyliatie zvyškového fotopolyméru. Zvyškový polymér môže byť znovu použitý. Pôvodne boli všetky fotopolyméry transparentné alebo aspoň čiastočne priesvitné, čo umožňuje posúdenie vnútornej štruktúry výrobku a dutín. [1]



Obr. 5: Stavba DLP tlačiarne [1]

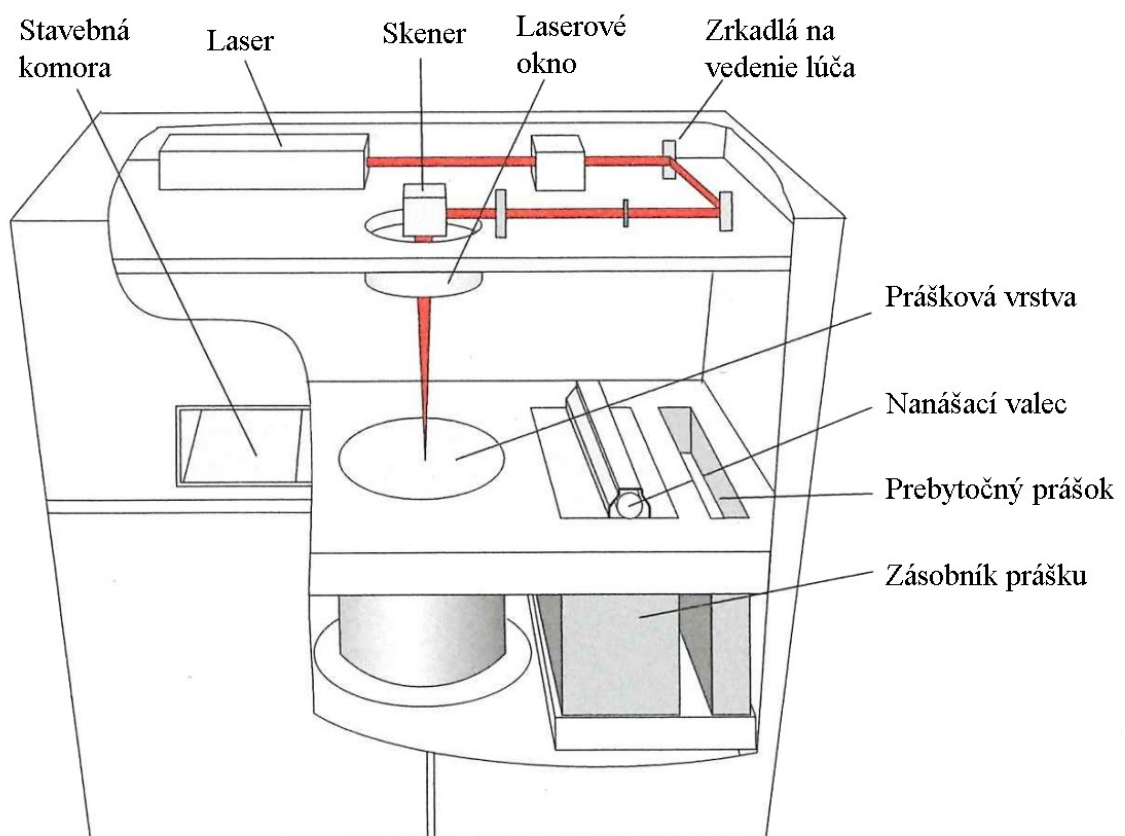
Medzi nevýhody patrí obmedzenosť použitia len na fotosenzitívne materiály. Hlavným stredobodom pozornosti pri výrobe fotopolymérov je schopnosť samotnej polymerizácie, preto sú mechanické vlastnosti brané ako druhoradé. Ďalšou veľkou nevýhodou je nutnosť dokončovacích prác, alebo „post-processing“. Tento proces môže byť časovo aj nákladovo náročný, keďže čistiace prvky musia byť pravidelne menené. [1]

Aj napriek tomu že plne vytvrdnutý polymér nie je toxický a môže byť vyhodnený ako odpad v domácnosti, nevytvrdený tekutý monomér je braný ako toxický odpad a vyžaduje špeciálne podmienky likvidácie. [1]

1.2.3 SLS (Selective Laser Sintering)

SLS je technológia, ktorá využíva laser ako zdroj tepla na čiastočné alebo úplne roztavenie častíc materiálu, ktoré sú vo forme prášku. Je možné použitie širokej škály materiálov vo forme práškov, a to napr. kovy, polyméry, kompozity alebo keramika. [3]

Celý proces výroby sa uskutočňuje v uzavretej, vyhrievanej komore, aby sa predišlo deformáciám. Taktiež aby sa zabránilo oxidáciám, tak je celý objem komory zaplavený ochranným plynom. [4]



Obr. 6: Stavba SLS tlačiarne [1]

Laser za pomoci skenovacieho systému lokálne nataví častice materiálu. [3] Rýchlosť výroby závisí na priemere laserového lúča a na rýchlosti skenovania. Zatiaľ čo sa laser pohybuje ďalej, už čiastočne roztavené častice začnú chladnúť predávaním tepla do okolia a tým sa vytvorí pevná vrstva. [4] Takto sa vytvorí celý prierez požadovaného výrobku. [3]

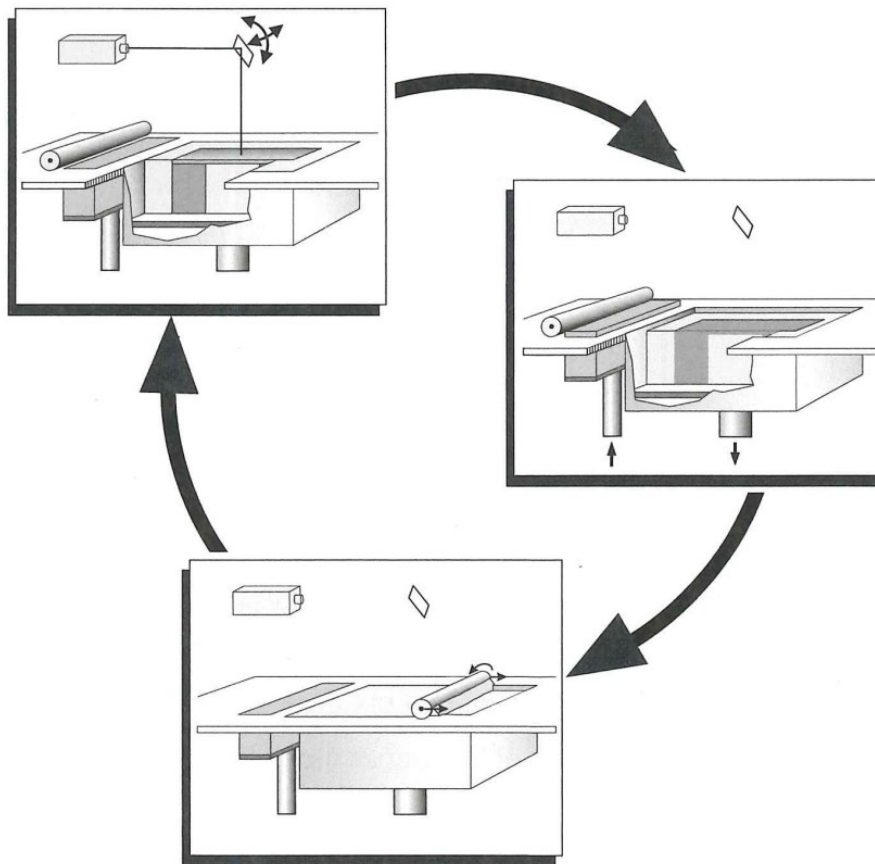
Po dokončení tohto procesu sa stavebná doska posunie smerom nadol o hrúbku jednej vrstvy. [4]

Následne nastane nanášanie vrstvy prášku na stavebnú dosku pomocou valca. Veľkosť častíc nanášaného prášku sa pohybujú v rozmedzí 20-50 μm . Aby sa zaistila rovnomerná distribúcia prášku, tak sa valec otáča opačným smerom, ako je jeho smer pohybu. Tento proces sa nazýva pretieranie (recoating). [4]

Výrobný proces sa opakuje až do nanosenia poslednej vrstvy. Na poslednú vrstvu sa naniesie ešte niekoľko dodatkových vrstiev neroztaveného prášku, ktoré umožnia rovnomerné ochladenie výrobku. Tento vzniknutý objekt sa nazýva práškový koláč (powder-cake). Môže sa nechať vychladnúť priamo v zariadení, ale chladenie v druhej komore umožní okamžité zahájenie nového výrobného procesu. [4]

Odstránenie výrobku z práškového koláča sa nazýva „vynorenie“ (break-out). Tento proces je vykonávaný manuálne pomocou vysávača, kief alebo stlačeného vzduchu s nízkym tlakom. [4]

Roztavenie alebo čiastočné roztavenie je možné vykonať u všetkých materiálov, ktoré sa správajú ako termoplasty, takže výber materiálov oproti SLA technológií je obrovský. Prášok ktorý nebol roztavený môže byť použitý znova na výrobu, ale väčšinou v určitom pomere s novým práškom. Tento pomer sa môže pohybovať od 30 do 50 % recyklovaného prášku. [1]



Obr. 7: Princíp SLS tlače [1]

Podpory sa v technológii SLS používajú, ale nie na rovnaké účely ako pri FLM alebo SLA. Samotnú podporu materiálu vykonáva prášok, zatiaľ čo sa tlačené podpory sa využívajú na kontrolu teploty alebo na uvoľnenie pnutí, ktoré vznikli chladením pri kovových práškoch. [1]

Nevýhodou je, že podobne ako pri SLA technológií, je post-processing je nevyhnutný. Pri natavovaní častíc sa čiastočne natavia aj susedné častice prášku a prilepia sa na povrch výrobku. Výsledkom je tzv. srst' (fur). Toto zabraňuje vytváraniu výrobkov s presnými rozmermi bez následného spracovania. [1]

Výroba dutých výrobkov je taktiež oveľa zložitejšia ako v SLA, keďže sa môžu častice prášku samovoľne odlepiť z povrchu. Táto vlastnosť zabraňuje využitiu technológie SLS v lekárskej oblasti, pretože sa takéto časti nedajú sterilizovať. Kvôli pórovitosti, ktorá vznikne pri natavovaní častíc sa napr. plastové výrobky môžu zaplňovať alebo sa ich povrch môže inak tepelne spracovávať. [1]

2 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V ADITÍVNEJ TECHNOLOGIÍ

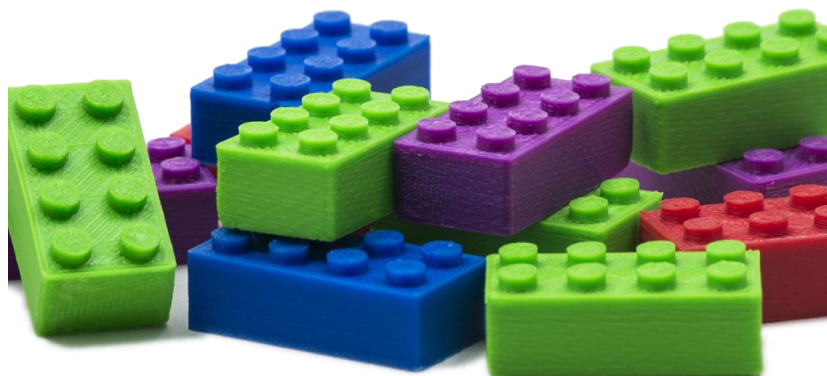
Keď si vyberáme, aký materiál máme použiť na výrobu daného výrobku aditívnou technológiou, máme na výber zo širokej škály materiálov. Musíme však zvažovať, akú funkciu bude výrobok mať, akým podmienkam bude vystavený a aký konečný vzhľad chceme dosiahnuť. [6]

Od 80. rokov 20. storočia prešli materiály pre 3D tlač značným vývojom. Dokážeme si vybrať z obrovského výberu materiálov, či už vo forme tekutiny, filamentu, granúl alebo peliet. Pre veľmi špecializované aplikácie sa postupne vyvíjajú špecifické materiály so žiadanými vlastnosťami. Príkladom takýchto aplikácií je napr. zdravotníctvo. [5]

2.1 ABS (Akrylonitrilbutadiénstyrén)

Materiál ABS bol oficiálne zavedený na trh v roku 1954. Je to kopolymér akrylonitrilu, butadiénu a styrénu. ABS je ako polotovar dostupný vo forme granúl alebo prášku. Hlavným dôvodom pre široké vyžitie sú jeho vynikajúce vlastnosti spomedzi termoplastov. [7] Medzi tieto vlastnosti patria napr. tvrdosť, pevnosť, nízka absorpcia vody, elektrická nevodivosť a aj nízka cena. [8]

Negatívnymi vlastnosťami ABS je malá odolnosť voči UV žiareniu a voči zvetrávaniu, takže nie je vhodný na vonkajšie použitie. [6,7]



© Simplify3D

Obr. 8: LEGO kocky vyrobené aditívnou technológiou z ABS [9]

Pre technológiu 3D tlače je ABS veľmi dôležitý. Bol to jeden z prvých používaných filamentov vďaka jeho dostupnosti. [9] ABS sa stáva mäkkým a poddajným pri teplote okolo 220 °C, čiže je nutný zohrievač s dostatočným výkonom. Adhézia tohto materiálu na stavebnú dosku je pomerne nízka, takže vyhrievaná doska je nutnosťou. [6] Pri nedostatočnej teplote okolia sa ABS taktiež môže deformovať, takže dosiahnutie geometrickej presnosti výrobkov môže byť v niektorých prípadoch náročné. [9]

ABS je vhodný na výrobu koncepčných a funkčných výrobkov, ako napr. ozubených kolies alebo inak do seba zapadajúcich častí. [6]

2.2 PLA (Kyselina polymliečna)

Kyselina polymliečna je termoplast, ktorý je vyrobený na báze biologických materiálov, konkrétne z kukuričného škrobu alebo z cukrovej trstiny. [6] Vďaka tomuto pôvodu je odbúrateľný a pomaly sa stal jedným z najpoužívanějších materiálov pre 3D tlač. [5]

Veľkú popularitu ale získal aj vďaka veľmi ľahkému použitiu. Teplota tavenia sa pohybuje len v okolí 180-200 °C v závislosti na použitých prísadách. Má veľmi dobrú adhéziu na väčšinu stavebných podložiek, takže je možná tlač aj bez použitia vyhrievanej podložky. [6]

PLA je tvrdý a odolný termoplast, ale teplotná odolnosť je nižšia ako pri ABS. Začne sa deformovať už pri teplote 60 °C a taktiež nie je chemicky odolný. Výrobky sa môžu rozbiť pri nadmernom zaťažení, keďže PLA je krehký materiál. [6]

Existujú rôzne druhy PLA s rozličnými prísadami. Niektorí výrobcovia vyrábajú tzv. "odolné PLA", aby sa svojimi vlastnosťami priblížil materiálu ABS, a to nižšou krehkosťou a vyššou tepelnou odolnosťou. [6]

2.3 PET (Polyetyléntereftalát)

Ďalším široko používaným materiálom je PET. Teplota tavenia tohto materiálu je 230 °C, takže podobne ako pri ABS je nutné použiť lepší zohrievač. Je to transparentný materiál a po ochladení sa podobá sklu. [6]

PET má veľmi dobré mechanické vlastnosti: nízka navíhavosť, tuhosť, dobrá odolnosť voči únave a dobrý pomer ceny k priaznivým vlastnostiam materiálu. [8] Je taktiež odolný voči slabým kyselinám a zásadám. Teplotná odolnosť sa pohybuje v rozmedzí medzi ABS a PLA, konkrétne teplota skleneného prechodu PET je 69 °C, takže sa môže použiť aj v tepelne

náročnejších podmienkach. [7] Je ako jeden z mála materiálov použiteľný na výrobky, ktoré budú v styku s potravinami, napr. nádoby na jedlo, poháre alebo príbor. [6]

Existuje taktiež variant PET, nazývaný PETG. Je to polyetyléntereftalát, ktorý bol modifikovaný glykolom. V porovnaní s PET má ešte vyššiu transparentnosť a nižšiu teplotu tavenia, čo umožňuje tlač pri nižších teplotách. Má výbornú odolnosť voči zvetrávaniu, takže je populárnym materiálom pre výrobu záhradných výrobkov. [6]

2.4 PC (Polykarbonát)

Polykarbonát je amorfný, vysoko transparentný termoplast, ktorý sa podobá akrylu. [8] je ľahký, húževnatý, tvrdý a má dobrú chemickú a teplotnú odolnosť. Vďaka týmto vlastnostiam má PC široké využitie, ako napr. v typických výrobkoch pre domácnosť (okuliare, DVD, fľašky), v automobilovom priemysle alebo vo vesmírnom priemysle. [7]

Čo sa týka oblasti 3D tlače, PC má veľmi vysokú teplotu skleného prechodu, a to 150 °C. Preto sa často používa na tepelne náročné aplikácie. Je však značne ťažší na tlač v porovnaní s PLA, PETG alebo ABS. Teplota trysky sa musí pohybovať v okolí 260 °C, čo väčšina tlačiarň v domácnosti nedokáže dosiahnuť. PC sa taktiež môže deformovať pri chladení, čím sa sťažuje dosiahnutie presných rozmerov vytlačeného výrobku. [10]



© Simplify3D

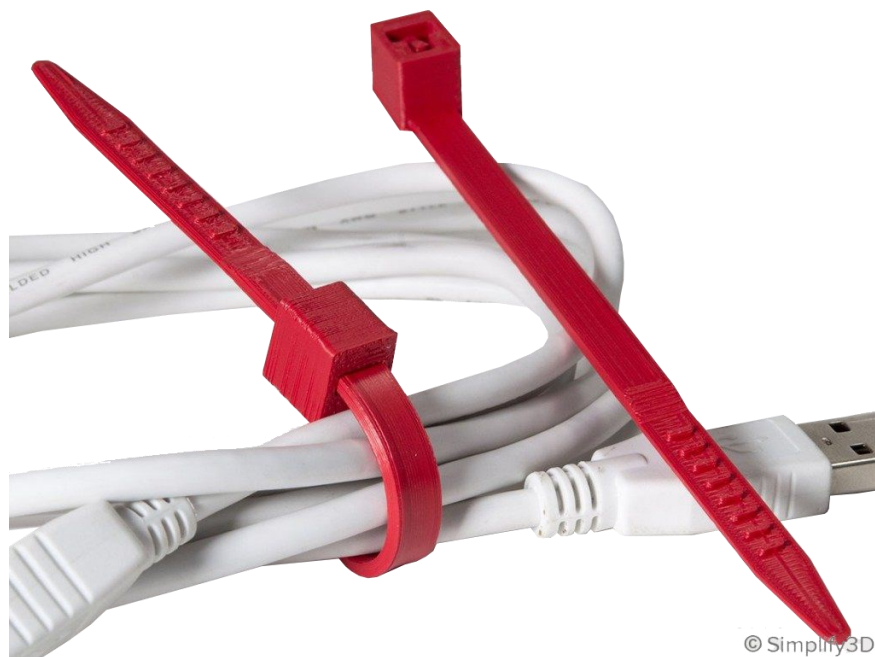
Obr. 9: Skoba vyrobená z PC [10]

PC je však veľmi hygroskopický materiál, čiže absorbuje vodu z okolia. Toto zhoršuje kvalitu výrobku a jeho mechanické vlastnosti. Z tohto dôvodu by mal byť PC skladovaný vo vzduchotesnej nádobe s čo najmenším množstvom vlhkosti. [10]

2.5 Nylon (Polyamid 6)

Nylon sa začal používať v aditívnej technológii pomerne nedávno. Dostal sa do pozornosti vďaka svojim unikátnym a výborným vlastnostiam. [6] Medzi tieto patria: vysoká pevnosť, tuhosť, húževnatosť, nízky koeficient trenia a výborná odolnosť voči chemikáliám ale aj tepelnému namáhaniu. [7] Keďže je ale bežne používaný v iných priemyselných odvetviach, je pomerne lacný a voľne dostupný. [6]

Jednou z najväčších prekážok pri tlačení s nylonom je teplota tavenia. Tá sa pohybuje v okolí 250 °C. Keďže väčšina zohrievačov takéto teploty nedosahuje, je nutné zabezpečiť špeciálne hardvérové vybavenie tlačiarne. [6] Nylon je taktiež veľmi navlhavý, čiže je nutné filament pravidelne sušiť a skladovať v špeciálnych priestoroch a podmienkach. [11]



Obr. 10: Rýchlosvorka na káble vyrobená z nylonu [11]

2.6 Materiály plnené vláknami

V dnešnej dobe už existujú aj špeciálne filamenty, ktoré obsahujú malé vlákna. Tieto vlákna zlepšujú mechanické vlastnosti materiálu. Je možné zakúpiť rôzne typy plnených filamentov, a to materiály ako sú PLA, PETG, nylon, ABS alebo PC. [12]

Vlákná sú značne silnejšie a tým spôsobujú zlepšenie mechanických vlastností, a to hlavne pevnosť a tuhosť. Majú však aj iné výhody. Výrobky vytlačené pomocou takýchto materiálov sú ľahšie a geometricky stabilnejšie, keďže vlákna pomáhajú predísť deformáciám pri chladení. [12]

Čo sa týka vlastností pri tlačení, teplota tavenia bude veľmi podobná, ako teplota materiálu, ktorý je použitý ako matrica. Jednou z veľkých nevýhod ale je, že kvôli pridaným vláknám bude upchávanie trysky pravdepodobnejšie. [12]



© Simplify3D

Obr. 11: Modelové lietadlo vyrobené z filamentu plneného uhlíkovými vláknami [12]

3 PREVODOVÉ MECHANIZMY

Prevodovka je mechanické zariadenie na prenos pohybu z jednej súčiastky na druhú. Na vyjadrenie prenosu energie cez prevodovku používame rýchlosť otáčania a moment medzi vstupným a výstupným členom prevodovky. [13]

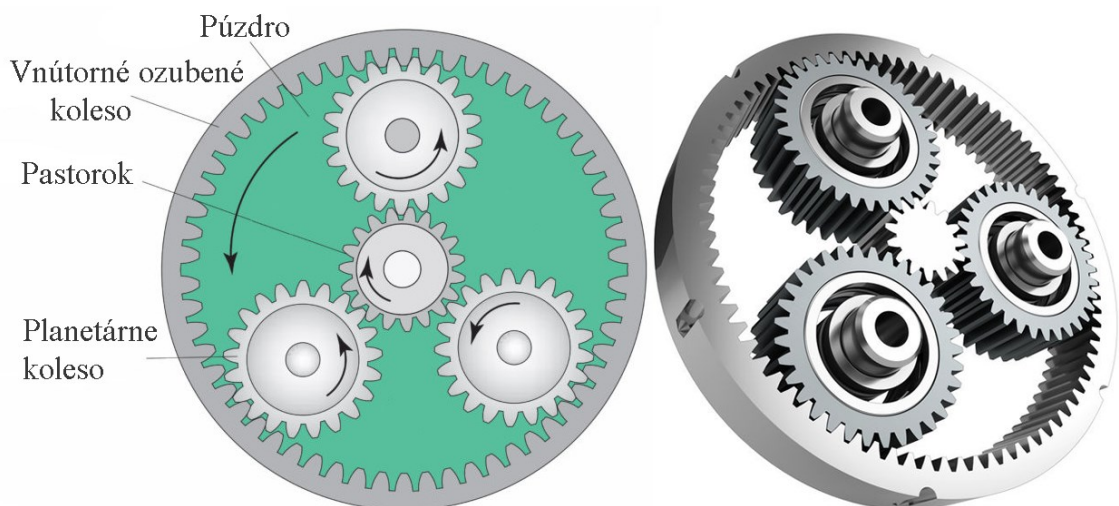
Prenos pohybu je jeden z najnákladnejších princípov pohybu vo všeobecnej mechanike. [13]

3.1 Planetárny prevod

Epicyklická prevodovka, taktiež nazývaná planetárna prevodovka je typ mechanickej prevodovky. Jej výnimočným prvkom je, že má dva stupne voľnosti podobne ako u diferenciálu. [13]

Tieto typy prevodoviek sú používané najmä tam, kde je potrebný veľký prevodový pomer v malom priestore. [13] Majú široké využitie v hybridných automobiloch, motocykloch alebo v turbínach. Taktiež sa používajú tam, kde je nutné prepojenie troch alebo viacerých hriadeľov. [12] [14]

Planetárna prevodovka sa skladá z centrálne umiestneného ozubeného kolesa, pastorka (sun gear), z vnútorného ozubeného kolesa po celom obvode prevodovky (ring gear) a z niekoľkých ozubených kolies, ktoré sa otáčajú a pohybujú medzi nimi, tzv. planetárne ozubené kolesá (planet gears). [15]



Obr. 12: Planetárna prevodovka [16][17]

Pojem epicyklická prevodovka pochádza z trajektórie, ktorá opisuje epicykloиду z pohľadu satelitných ozubených kolies. Najjednoduchším usporiadaním planetárnej prevodovky je zafixovanie pastorka. Vstupný hriadeľ sa spolu s centrálnym ozubeným kolesom otáča, čo

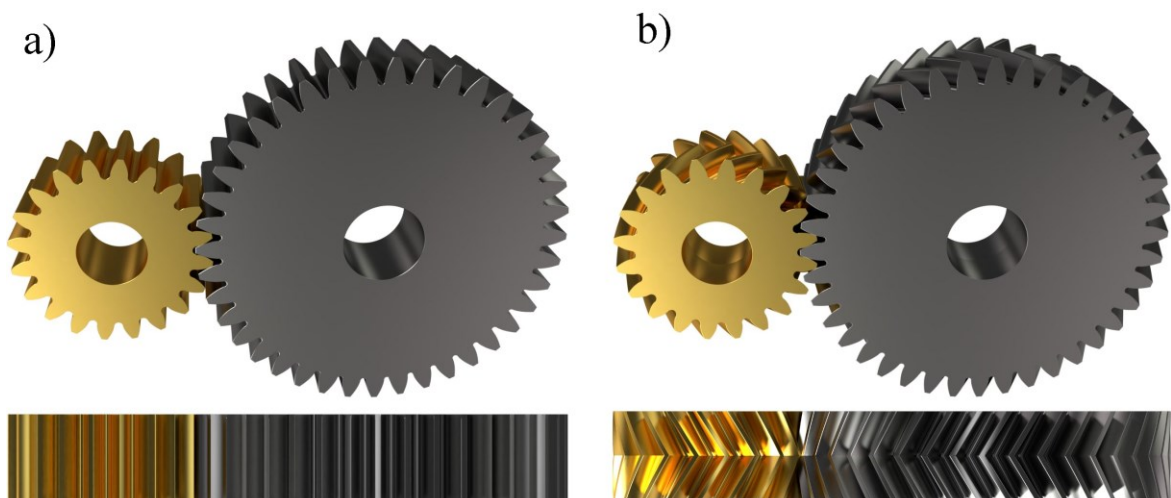
spôsobí otáčanie planetárnych ozubených kolies. Planetárne ozubené kolesá sú spojené pomocou nosiča, ktorý slúži ako výstupná hriadeľ. V takejto konfigurácii sa výstup točí v rovnakom smere ako vstup, ale pomalšie. [13]

Planetárne prevodovky majú niekoľko výhod v porovnaní s čelnými prevodmi. Pri rovnakých podmienkach má planetárna prevodovka dlhšiu životnosť a pracuje tichšie. [13]

Veľmi časté využitia sú vo veterných turbínach, kde redukovujú rýchlosti generátora, ktoré dokážu produkovať až 110 MW pri rýchlostiach otáčania až do 60 000 otáčok za minútu. [13]

3.2 Čelný prevod

Čelný prevod je typ prevodového mechanizmu, ktorý pozostáva z čelných ozubených súkolí. [15] Spájajú hriadele, ktoré sú vzhľadom k sebe uložené rovnobežne a otáčajú sa opačným smerom. [18] Ozubené kolesá môžu mať rôzne typy ozubenia, a to priame zuby, šikmé zuby, šípové zuby alebo krivkové zuby. V praxi sa ale najčastejšie stretáme s priamym ozubením. [15]



Obr. 13: Čelné súkolie s a) priamymi zubami b) šípovými zubami [19]

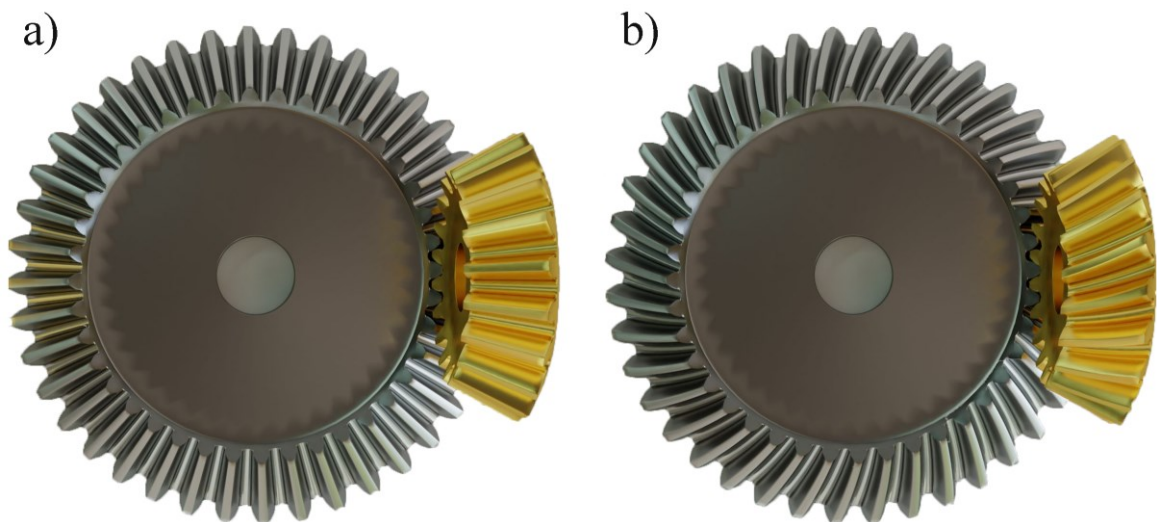
Vďaka svojmu jednoduchému dizajnu sa ľahko vyrábajú aj pri veľmi vysokých toleranciách. Sú často používané pri stredných rýchlostiach otáčania a dotyk na zuboch neprodukuje žiadne axiálne sily. Pri zapadaní do seba sa zuby dotýkajú celou svojou šírkou naraz v smere rovnobežnom s hriadeľom. Práve kvôli tejto šírke dotyku majú vysokú hlučnosť pri vysokých otáčkach. Hluk sa dá ale minimalizovať lubrikáciou. [18]

Efektívnosť prenosu energie týchto čelných ozubených kolies môže dosiahnuť až 99 %. [18]

3.3 Kuželový prevod

Kuželové prevody sú prevody, ktoré pozostávajú z rôznobežných hriadel'ov, ktorých osy ležia v rovnakej rovine a pretínajú sa. Najpoužívanejšia konfigurácia kuželových súkolí je 90° súkolie, kde sú hriadele orientované kolmo na seba. Dve základné rozdelenia kuželových ozubených kolies sú kolesá s priamymi zubami a ozubené kolesá so šikmými zubami. [20]

Kuželové ozubené kolesá s priamymi zubami sú najpoužívanejšie ozubené kolesá v tejto kategórii. Majú nízke podmienky na výrobu a dajú sa aplikovať na širokú škálu použití. Typické použitia tohto typu ozubeného kolesa sú limitované na aplikácie pri nízkych otáčkach, kde sú vibrácie a zvuk zanedbateľným faktorom. Sú však často používané v automobilovom priemysle na diferenciálne prevodové systémy a iné priemyselné aplikácie. [20]

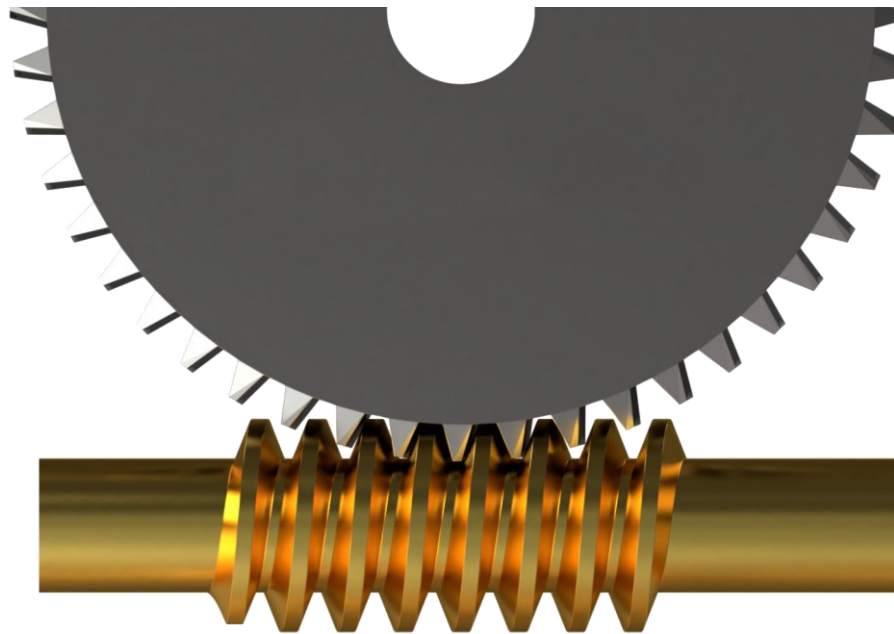


Obr. 14: Kuželové súkolie s a) priamymi zubami b) zakrivenými zubami [19]

Kuželové ozubené kolesá so šikmými zubami sú zložitejšie na výrobu vzhľadom na komplexný tvar zubov. Tento tvar však zabezpečuje postupný dotyk zubov a tým sa zaistí plynulý chod prevodu a zníži sa hlučnosť. Tieto typy ozubených kolies sa väčšinou používajú na vysoko-rýchlostné aplikácie a na vysoké prevodové pomery. [20]

3.4 Závitkový (šnekový) prevod

Šnekové prevody sú široko používané pri nerovnoběžných, kolmých prevodoch, ktoré neležia v jednej rovine a sú potrebné vysoké prevodové pomery. Šnekové súkolie sa skladá zo šneku a šnekového kolesa. [21]



Obr. 15: Šnekové súkolie [19]

Pri porovnaní s ostatnými ozubenými prevodmi, remeňovými prevodmi alebo reťazovými prevodmi je šnekové súkolie kompaktnjším spôsobom prevodu. Taktiež pri špeciálnej konfigurácii je možné, aby bol šnekový prevod samozamykateľný. Táto vlastnosť sa využíva, keď je nutné držanie pozície prevodu pri zastavení bez aktívneho brzdenia. [21]

4 POVRCHOVÉ ÚPRAVY

Výrobky vyrobené aditívnou technológiou môžu ďalej podstupovať dokončovacie práce na úpravu ich vlastností alebo vzhľadu. Tieto dokončovacie práce sa aplikujú hlavne vtedy, ak bude finálny výrobok postupovať ťažkým podmienkam alebo je nutné dosiahnuť určitej textúry povrchu. Dokončovanie 3D tlačených výrobkov je v mnohých aspektoch veľmi podobný konvenčnému dokončovaniu častí vyrobených technológiami ako napr. vstrekovanie alebo obrábanie. Ďalšie dôvody, prečo by sme chceli výrobok upraviť sú: zmena veľkosti výrobku, vyhladenie nerovností na povrchu alebo zvýšenie elektrickej vodivosti. [22]

Geometrický tvar vyrobeného výrobku určí, aké dokončovacie metódy bude možné aplikovať na konkrétny výrobok. Každá z metód dokáže dosiahnuť inú kvalitu povrchu a inú textúru. [23]

4.1 Obrusovanie brúsnyim papierom

Obrusovanie brúsnyim papierom je jednou z najpoužívanějších metód pri dokončovaní častí vyrobených 3D tlačou. Tento postup zahŕňa použitie brúsneho papiera na vyhladenie povrchu. Toto obrusovanie taktiež odstráni nedokonalosti, ktoré môžu vzniknúť pri tlači. [23] Najčastejšie sa však používa na odstránenie viditeľných znakov po tlači, ako nerovnosti po odstránení podpôr alebo medzivrstvové medzery. Brúsenie je často aj súčasťou iných dokončovacích procesov, napr. tých, ktoré vyžadujú drsnejší povrch na lakovanie. [22]



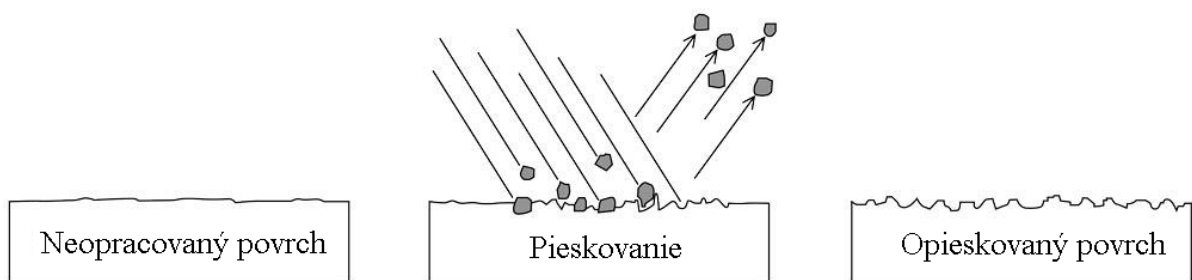
Obr. 16: Obrusovanie výrobku brúsnyim papierom [24]

Niektoré materiály ide brúsiť ľahšie ako druhé. Brúsenie ABS je relatívne jednoduché, preto treba dávať pozor, aby nevznikali preliačiny. [23]

Aj keď je brúsenie efektívna metóda na dokončovanie, je taktiež veľmi časovo náročná, hlavne pri manuálnom spôsobe. Ďalšou nevýhodou sú malé alebo úzke miesta, ku ktorým sa väčšinou nebude dať dostať, a preto ich nebude možné obrúsiť. [22]

4.2 Pieskovanie

Pieskovanie, taktiež nazývané vzduchové brúsenie, je proces povrchovej úpravy, keď pevné častice unášané v stlačennom vzduchu narážajú na povrch pieskovaného výrobku. Tento proces má za následok homogénny a anizotropný povrch. Zvýši sa drsnosť, odstránia sa povrchové znečistenia a zväčší sa plocha výrobku. [25]



Obr. 17: Diagram metódy pieskovania [26]

Ako brúsiace médium sú aplikovateľné rôzne materiály. Kremičitý piesok je jedným z najpopulárnejších médií, ale je možné použiť aj karbid kremíku, sódu bikarbónu alebo oxid hlinitý. [27]

4.3 Hladenie acetónovými parami

Hladenie acetónovými parami je chemická úprava povrchu, kedy sa povrch nataví pôsobením rozpúšťadla. Rozpúšťadlo nataví jednotlivé vrstvy výrobku a po vybratí z acetónových pár znova stuhnú. Tento spôsob sa používa najmä na zlepšenie vzhľadu, ale pracuje sa na štúdiách, ktoré skúmajú vylepšenie medzivrstvových charakteristík po hladení v acetónových parách. Konkrétne sa acetón používa ako rozpúšťadlo najmä na vyhladenie častí vyrobených z materiálu ABS. [28] Všeobecne sa acetónom môžu leptať materiály s obsahom styrénu. [22]



Obr. 18: Výrobok pred (pravá strana) a po (ľavá strana) vyhladení acetónovými parami [29]

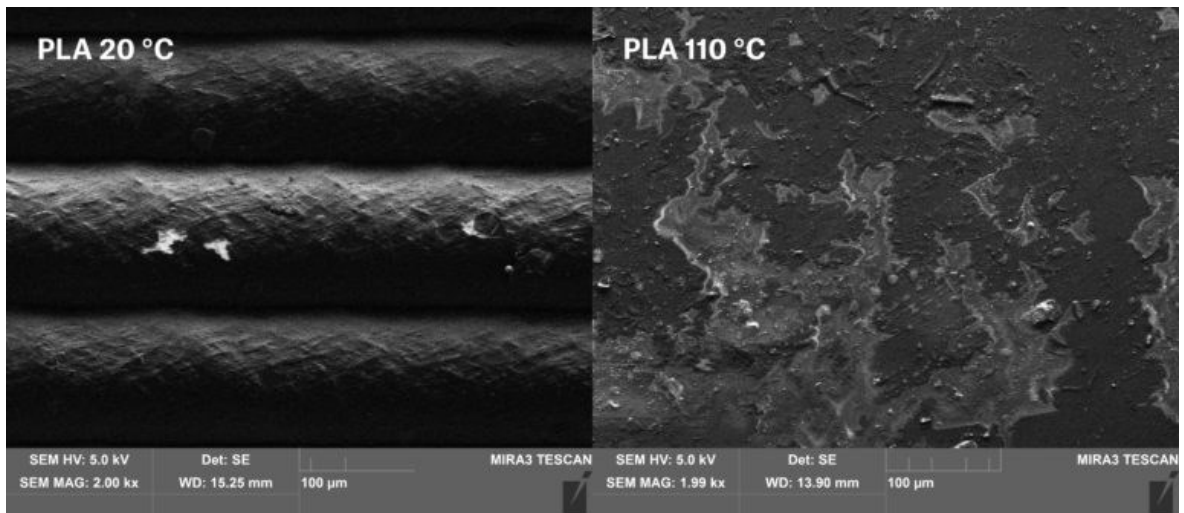
Tento proces zaplní všetky diery a póry, ktoré mohli vzniknúť na exteriéri pri 3D tlači, čo zabezpečí nepriechodnosť pre kvapaliny alebo plyny. [22] Taktiež dá materiálu lesklý povrch. Ak lesklý povrch nie je žiadaný, môže sa ďalej opracovávať pieskovaním alebo brúsením na dosiahnutie matného povrchu. [23]

4.4 Žihanie

Žihanie je proces, kedy ponechaním výrobku v komore so zvýšenou teplotou zlepšime jeho pevnosť, ťažnosť a teplotnú odolnosť. Je to dobre zdokumentovaný proces pre kovy a vstrekované plasty, ale nie pre 3D tlačené výrobky. [30]

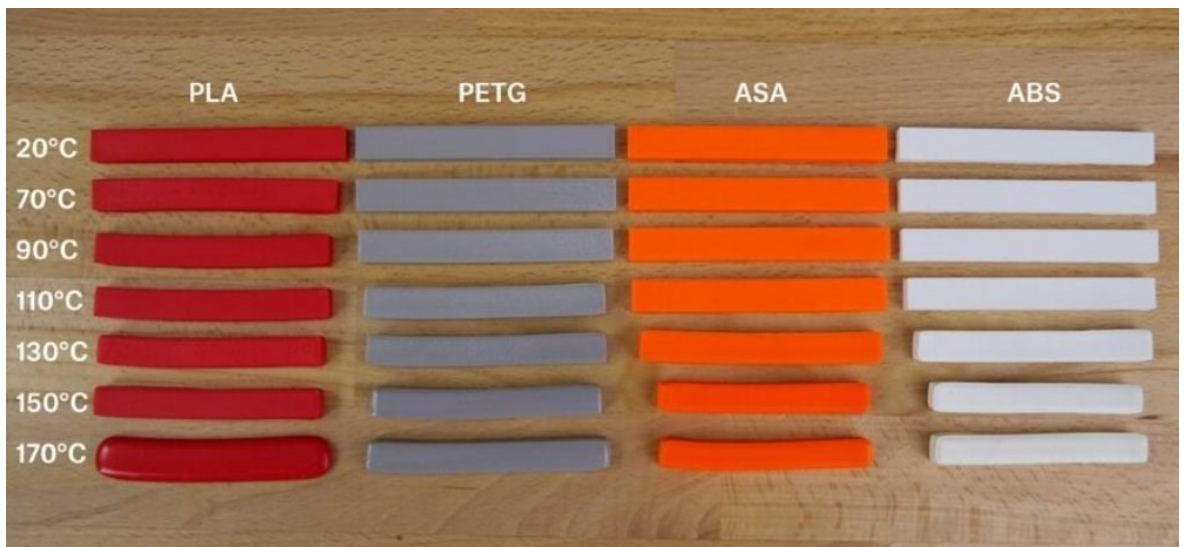
Pri extrúzií v 3D tlači sa materiál rýchlo zohreje, vytlačí a následne rýchlo schladí. Keďže je plast zlý teplotný vodič, dôjde k nerovnomernému chladeniu, čo má za následok vznik reziduálnych pnutí vo vnútri výrobku. Žihanie tieto miesta so vzniknutými pnutiami odstráni a zlepši pevnosť. [31]

Pri žihaní je výrobok zahriaty na teplotu skleneného prechodu materiálu, z ktorého je vyrobený. V blízkosti tejto teploty si vytlačený výrobok stále zachováva svoj tvar, ale je mäkkší a prebiehajú v ňom zmeny na molekulárnej úrovni, kde sa zlepšuje jeho štruktúrna stabilita. [30]



Obr. 19: Porovnanie povrchu (v smere osi z) materiálu PLA pred (pravá strana) a po žíhaní (ľavá strana) [30]

Nevýhodou žihania je relatívne veľká geometrická zmena výrobku. [30] Zmrštenie môže dosiahnuť hodnoty až 5 % pri materiáli PLA. Táto hodnota je ale vysoko ovplyvnená samotnou geometriou daného výrobku. [31]



Obr. 20: Deformácia rôznych materiálov pri rôznych teplotách žíhaní [30]

5 OPOTREBENIE

Opotrebenie, alebo oter, je postupný proces, kedy sa vzájomným pôsobením dvoch povrchov odstraňuje a deformuje materiál počas pohybu. [32] Opotrebenie sa môže uskutočňovať pri mechanickom styku ale aj následkom chemických procesov. Veda, ktorá sa zaoberá opotrebením sa nazýva tribológia. [33]

Hodnota opotrebenia je vysoko závislá na charakteristike dvoch stýkajúcich sa povrchov. Tieto charakteristiky sú ovplyvnené rôznymi vlastnosťami, ako napr. mikroštruktúra, prítomnosť vodnej pary, typ pohybu alebo geometrické nerovnosti a iné znečistenia. Práve tieto podmienky definujú typ opotrebenia. [34]

5.1 Tribológia

Tribológia je vedecký smer a technológia (teória a prax), ktorá sa zaoberá vzájomným pôsobením povrchov pri ich relatívnom styku, pohybe a s nimi súvisiacimi subjektami a praktikami. Je to plnohodnotná veda, ktorá zahŕňa čiastkové oblasti ako napr. tribofyzika, tribochémia, tribomechanika a iné. [35]

Problematika trenia, opotrebenia a mazania sú spojené s existenciou a vývinom ľudstva, keď pred vyše 500 000 rokmi poskytlo trenie človeku oheň a teplo, ale ich teoretické preskúmanie a dokumentácia stále nie sú dostačujúce. [35]

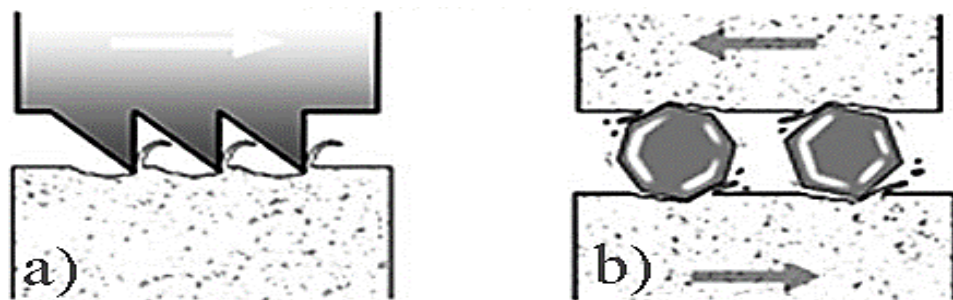
Tribotechnické prvky sú zložkami komplexných mechanických systémov, a preto je dôležité poznať jednotlivé pôsobenie medzi prvkami tribologického systému a ich správanie sa. Tribológia rieši teraz aj v budúcnosti rôzne problémy a medzi všeobecné ciele výskumnej práce možno zaradiť zdokonalenie úpravy povrchov nanášaním vrstiev, zaisťovanie bezpečnej prevádzky mazaných trecích uzlov, zaisťovanie vplyvu teploty v tribologických kontaktoch atď. [35]

5.2 Abrazívne opotrebenie

Abrazívne opotrebenie sa pozoruje pri posuvnom styku drsného, tvrdého materiálu s materiálom mäkším, pričom sa povrch mäkšieho materiálu poškodí a nastane uvoľnenie materiálu a plastická deformácia. Keďže prebieha medzi dvoma materiálmi, nazýva sa dvojtelesová abrázia. Tento typ opotrebenia sa vyskytuje napr. pri obrábaní ako brúsenie alebo frézovanie. [34]

Iným typom abrazívneho opotrebenia je prípad, kedy samotné poškodenie povrchu bolo spôsobené tretím telesom. Takýmto telesom sú voľné tvrdé častice zachytené medzi povrchmi dvoch telies. V takomto prípade je možné poškodenie iba jedného, alebo oboch povrchov zároveň. [34] Tento typ sa nazýva trojtelesová abrázia. [36] V praxi sa s týmto spôsobom stretávame pri pohyblivých uloženiach, pri znečistení nečistotami alebo mletí recyklátu a iných materiálov. [35]

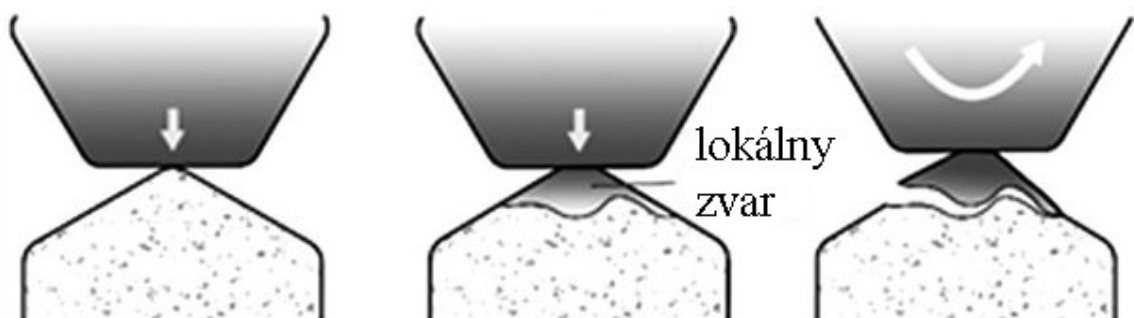
Abrazívne opotrebenie je jedným z najčastejších typov opotrebenia v mechanizmoch. Prejavuje sa drážkami, troskami, poškrabaním, jamkami alebo jemnými puklinami. [37]



Obr. 21: Abrazívne opotrebenie a) dvojtelesové b) trojtelesové [36]

5.3 Adhezívne opotrebenie

Adhezívne opotrebenie sledujeme vtedy, keď sú dve telesá stlačené do seba a nastane lokálne zvarenie. [36] Tento zvar môže byť na báze Van der Waalsových síl alebo môžu mať charakter iných silných chemických väzieb. [35] Pri pohybe pôsobia na tieto zvary strihové sily, ktoré ich namáhajú. Postupné odtrhnutie tohto zvaru sa nemusí stať v rovnakom mieste, v ktorom bol urobený pôvodný zvar, a tak je prenesené určité množstvo materiálu z jedného telesa na druhé. [36] Tento prenesený materiál často ostáva zachytený na povrchu a môže sa vrátiť na svoje prvotné miesto alebo sa odtrhne a stane sa z neho voľná častica – troska. [34] Trosky sa môžu akumulovať a spájať do väčších celkov, čo prispieva k abrazívnemu opotrebeniu. [36]

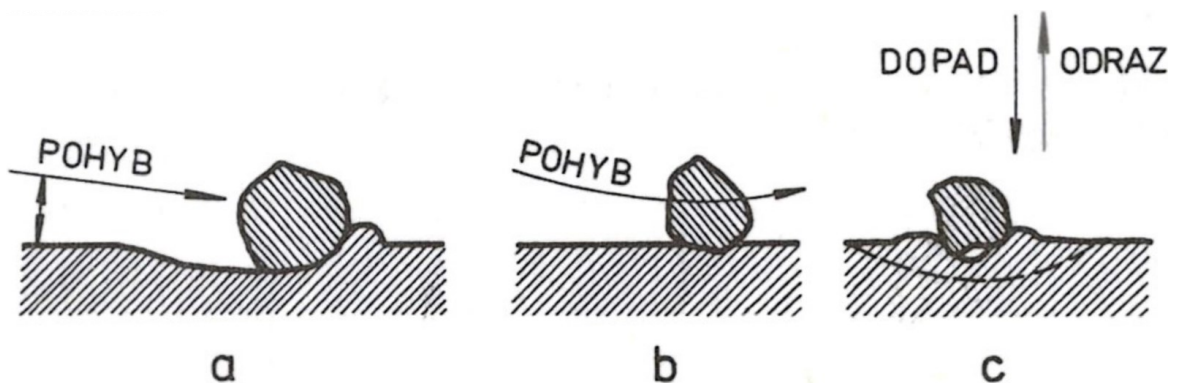


Obr. 22: Adhezívne opotrebenie [36]

5.4 Erozívne opotrebenie

Erozívne opotrebenie je strata materiálu z povrchu tuhého telesa pri narážaní častíc, ktoré sú unášané v kvapaline alebo pri pohybe kvapaliny či plynu. Existujú dva typy erózie, a to erózia s tuhými časticami a kvapalná erózia. Tieto typy a líšia tým, že prvá obsahuje tuhé častice, ktoré spôsobujú eróziu a druhá, v ktorej eróziu vykonáva samotná kvapalina. [37]

Erózia s obsahom tuhých častíc sa ďalej delí na abrazívnu eróziu a zrážkovú eróziu. [37] Pri tejto erózií je mnoho faktorov, ktoré ovplyvňujú rýchlosť opotrebenia. Medzi tie najvýraznejšie patria uhol nárazu, rýchlosť častice a veľkosť častice. [34]



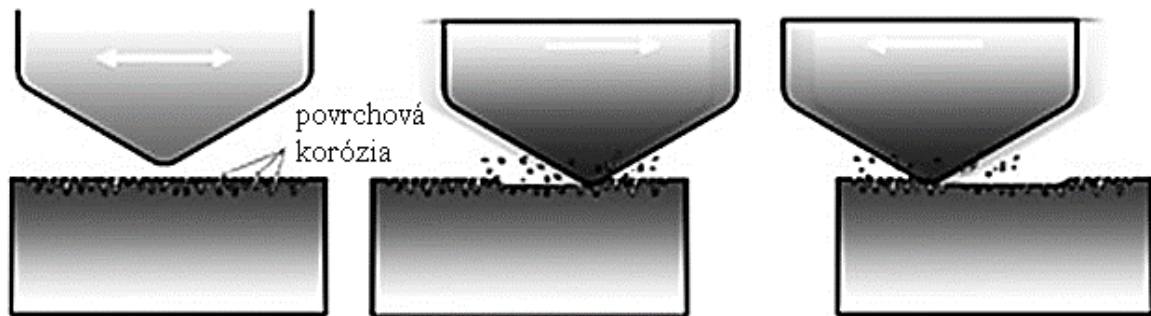
Obr. 23: Erozívne opotrebenie a) časticami nesenými v prúde kvapaliny b) časticami nesenými v prúde plynu c) prúdom kvapaliny [35]

5.5 Korozívne opotrebenie

Korózia je chemická reakcia medzi prostredím a povrchom telesa. Vo väčšine prípadov je táto reakcia rýchla ale tvorbou kohéznej vrstvy, ktorá chráni nižšie vrstvy, sa jej rýchlosť spomalí. Pri namáhaní sa ale môže stať, že sa posuvným pohybom s ďalším povrchom iného telesa táto vrstva poškodí alebo odstráni, čo spôsobí odhalenie nižších vrstiev. Tento spôsob odstránenia kohéznej vrstvy sa stáva najmä vtedy, keď je vrstva mäkkšia ako povrch trecieho telesa alebo nie je pevne viazaná. [36]

Korozívne opotrebenie sa rozdeľuje na mokré alebo suché. Mokré sa vyskytuje väčšinou v roztokoch ako je voda s určitými rozpustenými látkami, ktoré vytvárajú kyslé prostredie. Suché korozívne opotrebenie sa vyskytuje v prítomnosti atmosféry alebo iných plynov. [38] Kyslík sa považuje za hlavné korózne médium v našej atmosfére na Zemi. Korozívne opotrebenie, ktoré nastáva v atmosfére sa taktiež nazýva oxidačné opotrebenie. [34]

Korozívne opotrebenie je významným faktorom v rôznych typoch priemyslu, ako napr. chemický priemysel, ťažobný priemysel alebo pri spracovávaní minerálov. [34]

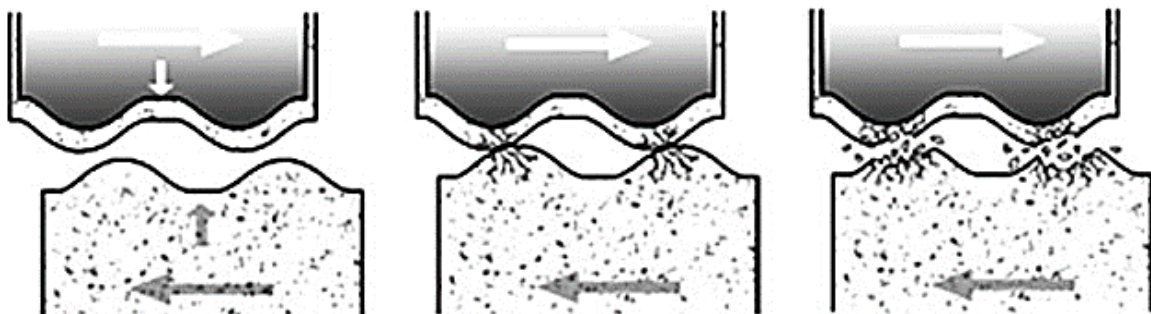


Obr. 24: Korozívne opotrebenie [36]

5.6 Únavové opotrebenie

Únavové opotrebenie je jedným z najrozšírenejších mechanizmov oddeľovania častíc pri porušovaní povrchovej vrstvy telesa. [35] Je spôsobené opakovaným namáhaním materiálov (rotačný alebo vratný pohyb), ktoré po určitej dobe vedie k vytvoreniu mikroprasklín na povrchu alebo pod povrchom telesa. Kontinuálnym namáhaním mikroplaskliny rastú a spájajú sa, čo môže viesť k oddeleniu častíc z povrchu telesa. [36] Je to zložitý proces, keďže pri cyklickom styku dvoch povrchov dochádza ku stlačeniu, naťahovaniu a ku strihu povrchovej vrstvy materiálu. [39]

Pri cyklickom namáhaní sa ale nevyskytuje len mechanická zložka opotrebenia, ale aj rovnako dôležitá teplotná zložka. Pri styku povrchov sa teplota na rozhraní výrazne zvýši čo spôsobuje teplotné pnutie. Podobne ako pri mechanickom namáhaní, cyklické teplotné namáhanie môže vyvolávať permanentnú zmenu v mikroštruktúre a tvorbu prasklín. V extrémnych prípadoch môže teplota pri dotyku telies dosiahnuť teplotu tavenia materiálu, z ktorého je teleso vytvorené, čo má ďalšie nezávislé účinky na opotrebenie materiálu. [39]

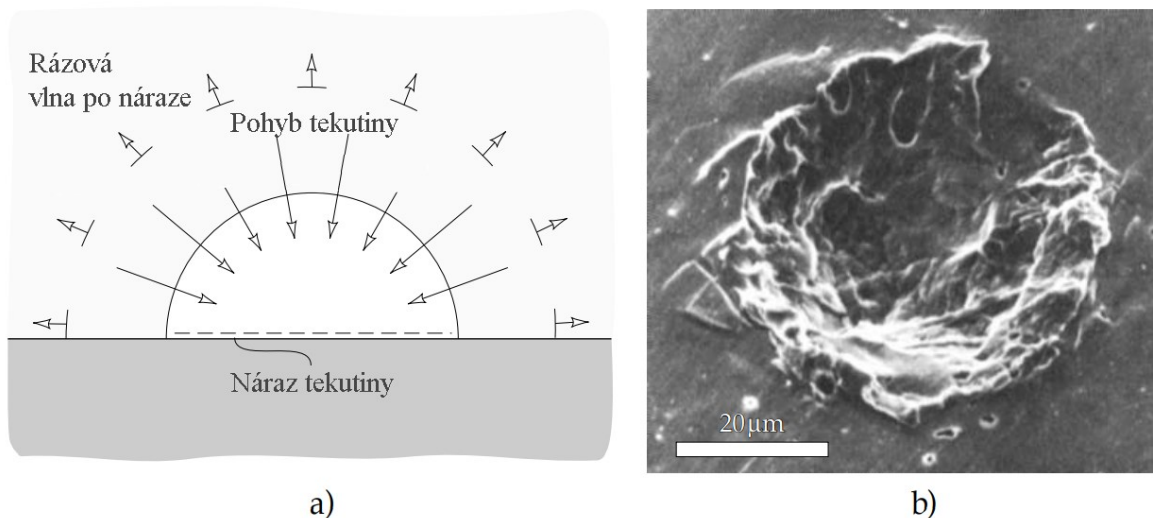


Obr. 25: Únavové opotrebenie [36]

5.7 Kavitačné opotrebenie

Kavitačné opotrebenie je charakterizované cyklickým porušením povrchu telesa nárazom prúdu tekutiny pri veľmi vysokej rýchlosti, ktorá obsahuje plynové bublinky. [35] Pri náraze na povrch telesa bublinky zanikajú, a tekutina, ktorá je najbližšie k povrchu bubliny je prudko zrýchlená a po náraze na povrch prudko spomalená. Tento náraz medzi tekutinou a telesom vytvára veľké pnutie, ktoré môže poškodiť povrch telesa. [40] Kavitácia zvyšuje drsnosť postihnutého povrchu. [35]

Kavitačné opotrebenie spôsobuje vážne poškodenie na zariadeniach ako vrtule alebo turbíny, ktoré pracujú v tekutinách. Opotrebenie spôsobuje tvorbu jednotlivých jamiek a dier na povrchu telesa. Celé zariadenie môže byť týmto procesom zničené. Taktiež časti ako napr. vrtule na lodiach sú často pracovne obmedzené vibráciami spôsobenými kavitačnými javmi. Kavitácia môže byť urýchlená korozívnymi alebo erozívnymi kombináciami opotrebovania, pričom vzniká synergický účinok. [40]



Obr. 26: Kavitačné opotrebenie a) mechanizmus kolapsu bubliny plynu b) jamka zanechaná kolapsom bubliny v indiu

Kavitačné opotrebenie ale nie je vždy nežiadúce. Svoje uplatnenie našlo v medicíne, kde je využívané na odstránenie obličkových kameňov. Využíva sa litotrypsia extrakorporálnou rázovou vlnou (LERV), kedy sa silnými ultrazvukovými vibráciami vytvárajú bublinky v moči pri obličkovom kameni. Ten je postupne opotrebovaný kavitáciou až pokiaľ z kameňa nezostane iba prach. [40]

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

6 NÁVRH A CIELE EXPERIMENTU

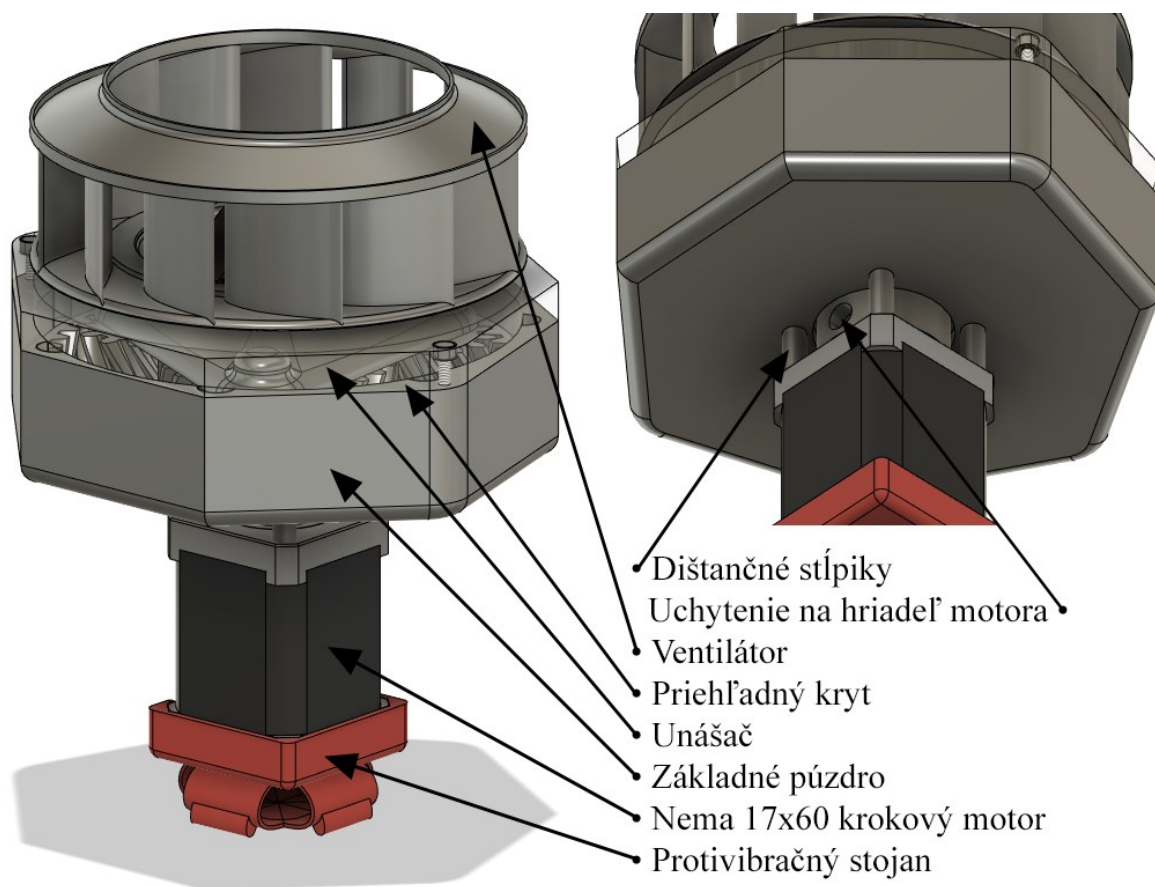
Cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnuť a vyhotoviť mechanizmus na skúmanie opotrebenia ozubených kolies. Povrch týchto telies bude následne upravený rôznymi metódami a budú skúmané rozdiely medzi hodnotami opotrebenia.

Pre bakalársku prácu boli stanovené nasledovné ciele:

1. Vypracuje literárnu rešerš na dané téma
2. Vytvoríte funkčný model mechanizmu metódou 3D tlač
3. Na vybrané diely aplikujete povrchové úpravy a sledujte chovanie v mechanizme
4. Vyhodnoťte získané výsledky

V literárnej rešerši boli vypracované rôzne typy aditívnej technológie, ale v praktickej časti bola použitá iba jedna. Boli taktiež spomenuté viaceré možnosti úpravy povrchu a prakticky boli použité dve, a to pieskovanie a leptanie.

6.1 CAD návrh

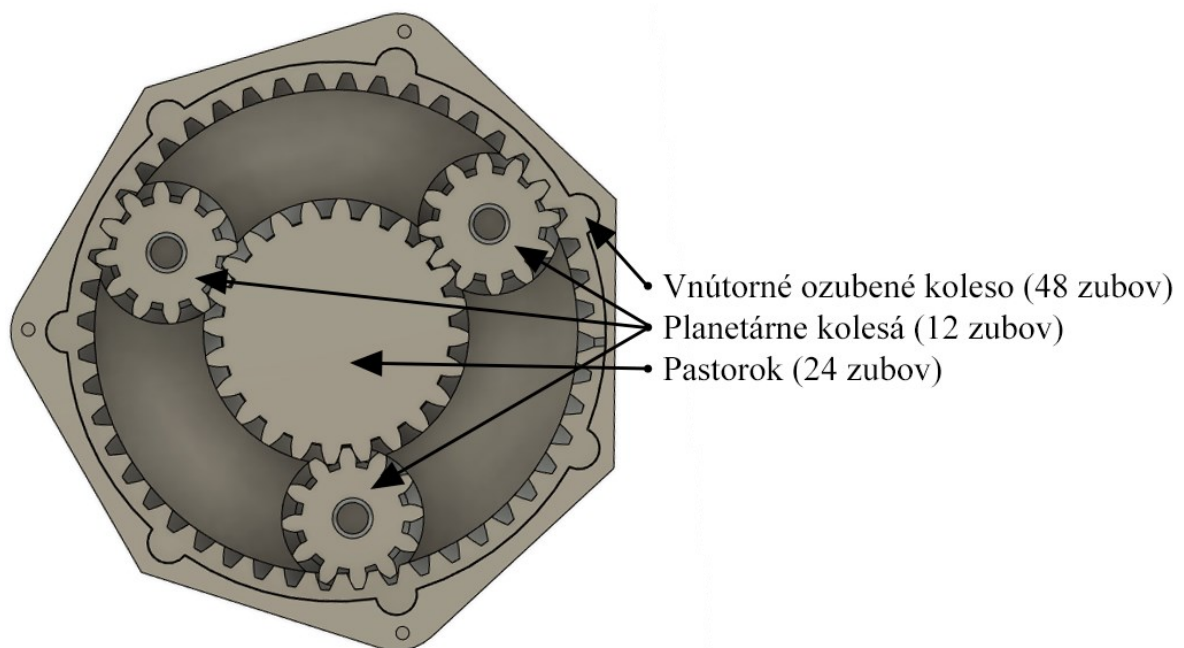


Obr. 27: Návrh sústavy v programe Fusion 360

Ako mechanizmus bol zvolený planetárny prevod so šípovými zubami zložený z jedného pastorku, troch planetárnych kolies, na ktorých bude prebiehať samotné meranie a jedného vnútorne ozubeného kolesa, a to z niekoľkých dôvodov:

- Šípové zuby sú samostrediacie, takže počas celého experimentu bude plocha zubov v kontakte rovnaká, bez nutnosti návrhu presného strediaceho systému
- Použitím troch meraných planetárnych kolies zvýšime presnosť merania bez veľkého nárastu času merania
- Celková stavba sústavy je jednoduchá, kompaktná a samopodporná

Celá sústava bola navrhnutá v CAD programe Autodesk Fusion 360. Zakúpené a normalizované časti boli importované od výrobcu, model ventilátora bol stiahnutý z komunitnej knižnice modelov a ostatné časti boli vymodelované.



Obr. 28: Usporiadanie ozubených kolies

Celkový prevodový pomer tohto systému je $1:0,\overline{33}$, takže ventilátor rotuje 3x pomalšie ako hriadeľ krokového motora. Ventilátor bol pridaný z dôvodu zvýšenia zaťaženia prevodového systému aj ako chladenie pre ovládač krokového motora.

6.2 Použité materiály

Všetky nenormalizované a nezakúpené diely boli vyrobené pomocou aditívnej technológie, konkrétne pomocou FLM procesu na tlačiarni Průša Mini+ od spoločnosti Průša Research by Jozef Průša.

6.2.1 Nefunkčné súčiastky

Súčiastky, ktoré boli funkčne nekritické pre meranie, boli vytvorené z PLA filamentu. Keďže boli merania vykonávané na laboratórnom stole, ktorý mal na povrchu keramické obkladačky, všetky vibrácie sa z krokového motoru prenášali do stolu a spôsobovali veľmi hlučný chod. Z tohto dôvodu bol vymodelovaný a vytlačený protivibračný stojan z TPU filamentu o tvrdosti 98 Shore A, ktorého úlohou bolo absorbovať a ďalej neprenášať tieto vibrácie.



Obr. 29: Nefunkčné súčiastky

6.2.2 Funkčné súčiastky

Medzi funkčné súčiastky podľa opisu obrázka 28 patrili pastorok a vnútorné ozubené koleso. Tieto ozubené kolesá boli v priamom kontakte s meranými ozubenými kolesami, takže voľba materiálu bola rovnako dôležitá ako u meraných súčiastok.

Pre tieto súčiastky boli zvolené dva rôzne materiály, ktoré boli ďalej porovnávané podľa množstva opotrebenia meraných planetárnych kolies. Prvým z materiálov bol obyčajný PLA filament a druhým bol CPE filament, špeciálne modifikovaný PETG filament.



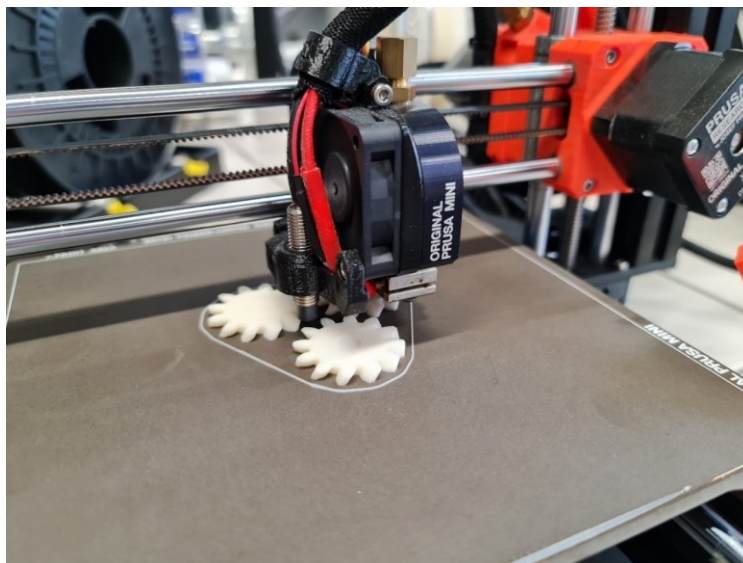
Obr. 30: Funkčné súčiastky z PLA filamentu

6.2.3 Merané súčiastky

Výber materiálu pre merané súčiastky, planetárne kolesá, bol veľmi dôležitý krok, keďže sa niektoré metódy úpravy povrchu nedajú ekvivalentne vykonať na všetkých druhoch materiálov.

Medzi hlavné metódy úpravy povrchu patrí leptanie. Ak by sme chceli leptať súčiastku vyrobenú z PLA filamentu, museli by sme použiť chloroform, čo je vysoko toxická chemikália. Pri leptaní materiálu ABS stačí použiť výpary z acetónu, čo je bežne predávaný produkt v obchodoch s farbami. Leptanie trvá rádovo iba sekundy, ak vytvoríme v nádobe s acetónom atmosféru acetónových výparov so zvýšenou teplotou. ABS je taktiež mäkkší materiál v porovnaní s PLA, takže sa ľahšie opracováva brusným papierom alebo metódou pieskovania.

Z týchto dôvodov bol ako materiál pre merané planetárne kolesá zvolený ABS filament od spoločnosti Fillamentum.

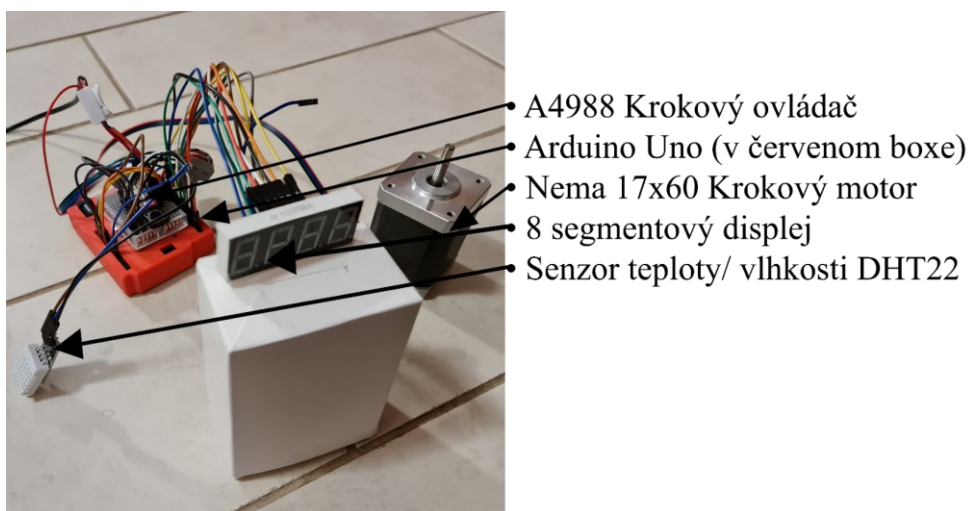


Obr. 31: Merané ozubené kolesá z ABS filamentu na tlačiarni Průša Mini+
 Približná hmotnosť jedného telesa bola 10 gramov. Veľkosť vrstvy u všetkých vytlačených vzoriek bola 0,1 mm s úplným vyplnením celého objemu. Jedna vzorka bola vysoká 20 mm, takže sa skladala z 200 vrstiev vytlačeného materiálu a tlač trvala 3 hodiny. Vcelku bolo vytlačených 36 jednotlivých kolies, takže čistý čas samotnej tlače bol približne 110 hodín. Reálny čas bol ale vyšší, keďže boli navyše tlačené vzorky na prvotné ladenie mechanizmu a na skúšanie povrchových úprav.

6.3 Ovládanie mechanizmu

Keďže je celý mechanizmus poháňaný krokovým motorom, je nutné zabezpečiť správne zapojenie do ovládača krokového motora a naprogramovanie mikropočítača.

Bol použitý A4988 krokový ovládač v kombinácii s Arduino Uno Rev3 mikropočítačom.

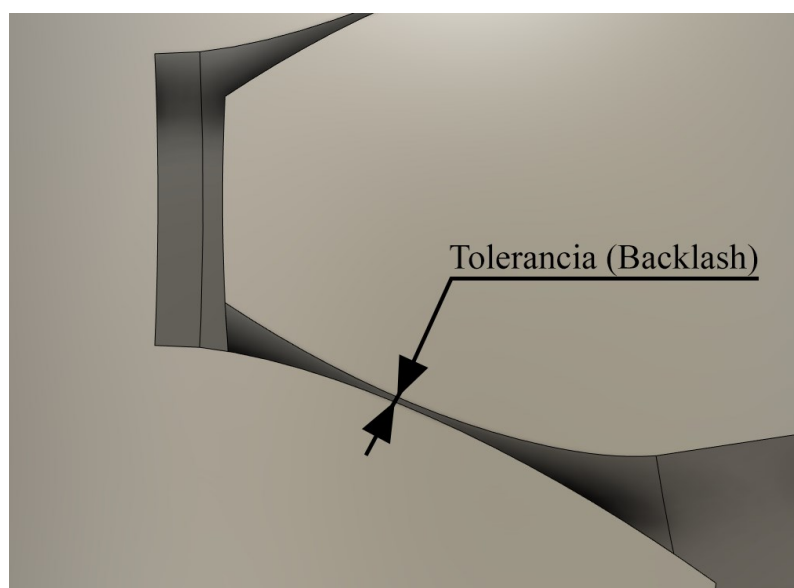


Obr. 32: Riadiaci obvod na ovládanie krokového motora Nema 17

Okrem nevyhnutných prvkov boli taktiež pridané prvky na skvalitnenie merania. Prvým je senzor teploty a vlhkosti DHT 22 a druhým je 7 segmentový, 4-miestny displej na zobrazenie nameraných hodnôt teploty a vlhkosti. Pred začatím každého merania boli odmerané a zaznamenané tieto hodnoty, aby bola zabezpečená maximálna presnosť merania.

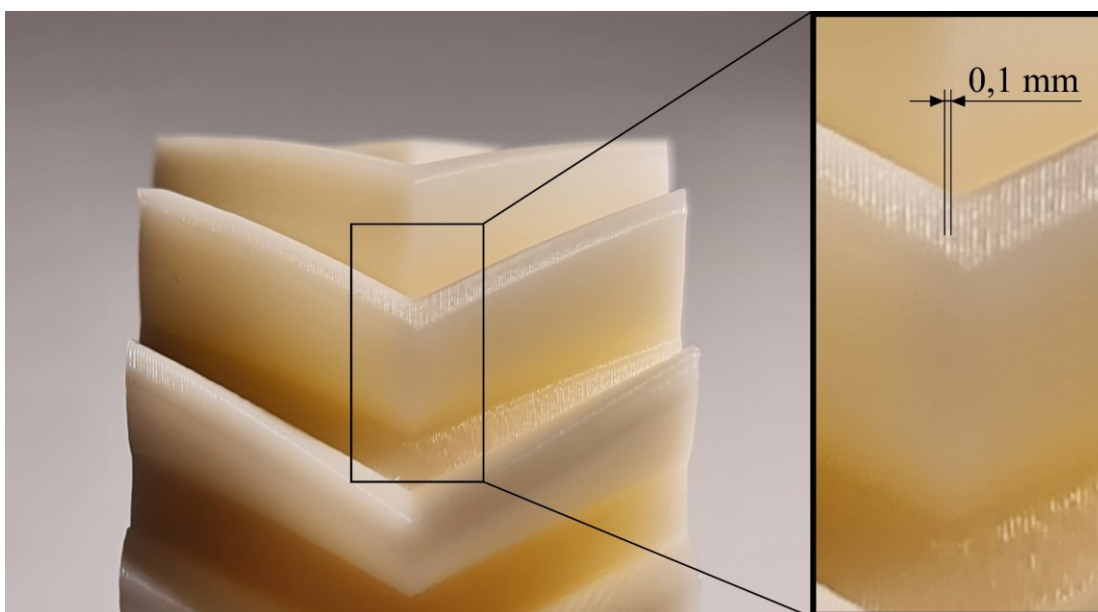
7 POVRCHOVÉ ÚPRAVY MERANÝCH OZUBENÝCH KOLIES

Všetky vytlačené planetárne kolesá, okrem referenčných vzoriek, podstúpili jednu alebo kombináciu viacerých povrchových úprav. Celkovo bolo meraných 36 jednotlivých kolies zaradených do 12 skupín, v každej skupine po 3 ozubené kolesá. Jednou z premenných bola aj tolerancia jednotlivých telies, podľa ktorej boli skupiny kolies zaradené do jednej z dvoch kategórií. Prvá tolerancia bola 0,1 mm medzi kolesami a druhá 0,2 mm. Tieto tolerancie boli zvolené z dôvodu rôznych výsledkov pri testovaní realizovateľnosti tohto experimentu.



Obr. 33: Grafické zobrazenie tolerancie medzi ozubenými kolesami

7.1 Žiadne povrchové úpravy



Obr. 34: Povrch neupraveného planetárneho kolesa

Vzorky z obrázka 34 slúžili ako referenčné prvky a nebola na nich prevedená žiadna povrchová úprava. Boli odobrané priamo z tlačovej dosky 3D tlačiarne a následne testované.

7.2 Pieskovanie

Ďalšia skupina vzoriek bola pieskovaná pomocou abrazívneho pieskovacieho média Maxi-Blast MC2 v pieskovacom boxe Unicraft SSK3. Každá vzorka bola umiestnená na kolík a povrchovo upravená. Dĺžka času pieskovania bola pre každú vzorku rovnaká, a to 60 sekúnd.



Obr. 35: Pieskový box Unicraft SSK3 (naľavo) a abrazivo Maxi-Blast CK2 (napravo)



Obr. 36: Povrch planetárneho kola po 60 sekundách pieskovania

7.3 Leptanie

Posledná skupina vzoriek bola kombináciou obidvoch procesov úpravy povrchu. Najskôr boli merané telesá pieskované po dobu 60 sekúnd a následne leptané. Leptanie ďalej rozdelilo tieto vzorky do troch ďalších skupín:

1. Vzorky leptané po dobu 5 sekúnd
2. Vzorky leptané po dobu 10 sekúnd
3. Vzorky leptané po dobu 15 sekúnd

Leptanie prebiehalo v sklenenej nádobe, ktorá bola zo spodnej časti zohrievaná a obsahovala 200 ml acetónu ako leptacie médium. Po zohriatí sa v nádobe vytvorila acetónová hmla, v ktorej boli povrchové vrstvy vzoriek leptané.



Obr. 37: Sklenená nádoba na leptanie

Ak by boli vzorky kontinuálne leptané dlhšie ako 5 sekúnd, mohlo by dôjsť k veľkej deformácii a nataveniu prevažnej časti materiálu, čo by zabránilo správne fungovaniu v mechanizme. Z tohto dôvodu bolo nutné rozdeliť leptacie časy na 5 sekundové segmenty s dostatočne dlhou dobou na vychladnutie. Po dodatočnom testovaní

leptacieho času a prestávky na vychladnutie bolo zistené, že po každom leptacom čase je nutných minimálne 15 sekúnd na schladenie vzorky. Z tohto vyplýva, že čas leptania 10 sekúnd bol rozdelený na 5 sekúnd leptania, 15 sekúnd chladnutia a potom ďalších 5 sekúnd leptania. Tento prístup zabezpečuje, že iba povrchová vrstva bude natavená a poleptaná, pričom si teleso udrží svoj pôvodný tvar. Nakoniec boli všetky leptané vzorky vysušené na vzduchu po dobu jedného dňa.



Obr. 38: Povrch planetárneho kolesa po 60 sekundách pieskovania a 15 sekundách leptania

8 ŠTATISTICKÉ SPRACOVANIE

Na spracovanie výsledkov získaných pri meraní opotrebenia a iných typoch merania boli použité základné štatistické veličiny. Súbory nameraných hodnôt boli takmer vo všetkých prípadoch dostatočne veľké na to, aby sme mohli použiť aritmetický priemer spolu so smerodajnou odchýlkou na presnú reprezentáciu výsledkov merania. U meraní, ktoré majú len päť hodnôt je použitý aj medián spolu s aritmetickým priemerom, ak by odľahlá hodnota výrazne ovplyvnila hodnotu aritmetického priemeru.

8.1 Aritmetický priemer

Aritmetický priemer je základná štatistická veličina, ktorá vyjadruje strednú hodnotu štatistického súboru. Je to jedna z najpoužívanejších štatistických veličín. Veľkou nevýhodou je ľahké ovplyvnenie hodnoty aritmetického priemeru jednou odľahlou hodnotou a tým nastáva skreslenie výsledkov merania. V zápise sa často používa súčasne so smerodajnou odchýlkou.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

8.2 Smerodajná odchýlka

Smerodajná odchýlka je hodnota, ktorá vyjadruje veľkosť odchýlenia od strednej hodnoty. Pri veľkých hodnotách smerodajnej odchýlky je meranie nepresné alebo sa v súbore nachádza odľahlá hodnota. Naopak pri nízkych hodnotách naznačuje presné meranie s podobnými prvkami.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

8.3 Medián

Medián je štatistická veličina, ktorá rozdeľuje súbor dát na dve rovnako početné časti. Je nutné, aby bol súbor dopredu rozdelený vzostupne alebo zostupne. Na rozdiel od aritmetického priemeru nie je ovplyvnený odľahlými hodnotami. Pri párnom počte prvkov sa za medián berie aritmetický priemer hodnôt v oblasti prostrednej hodnoty.

$$\tilde{x} = \frac{n + 1}{2} \quad (3)$$

8.4 Lineárna regresia

Je to matematická metóda, ktorá slúži na preloženie súboru bodov priamkou. Predpokladá sa, že vzťah medzi týmito závislosťami je lineárny. Taktiež sa predpokladá, že hodnoty na osi x sú presné, zatiaľ čo hodnoty na osi y môžu byť zaťažené určitou chybou. Pri meraní opotrebenia je použitá na kvantifikáciu porovnania rýchlosti opotrebenia medzi rôznymi povrchovými úpravami.

$$y = ax + b \quad (4)$$

9 MERANIE OPOTREBENIA

Existujú rôzne štatistické vyjadrenia miery opotrebenia. Medzi základné veličiny patria:

1. Stratená hmotnosť
2. Stratený objem

Keďže je miera opotrebenia kolies v časovom úseku, ktorý bol použitý pri tomto meraní malá (rádovo miligramy), meranie strateného objemu s dostatočne veľkou presnosťou by bolo príliš náročné až nedosiahnuteľné. Z tohto dôvodu bola za hlavnú veličinu na vyjadrenie miery opotrebenia zvolená stratená hmotnosť. Tá sa dala vyjadriť dostatočne presne na laboratórnych váhach KERN. Všetky namerané hodnoty získané počas celého merania sú zaznamenané v externe priloženom súbore s názvom *Namerané hodnoty.xlsx*.

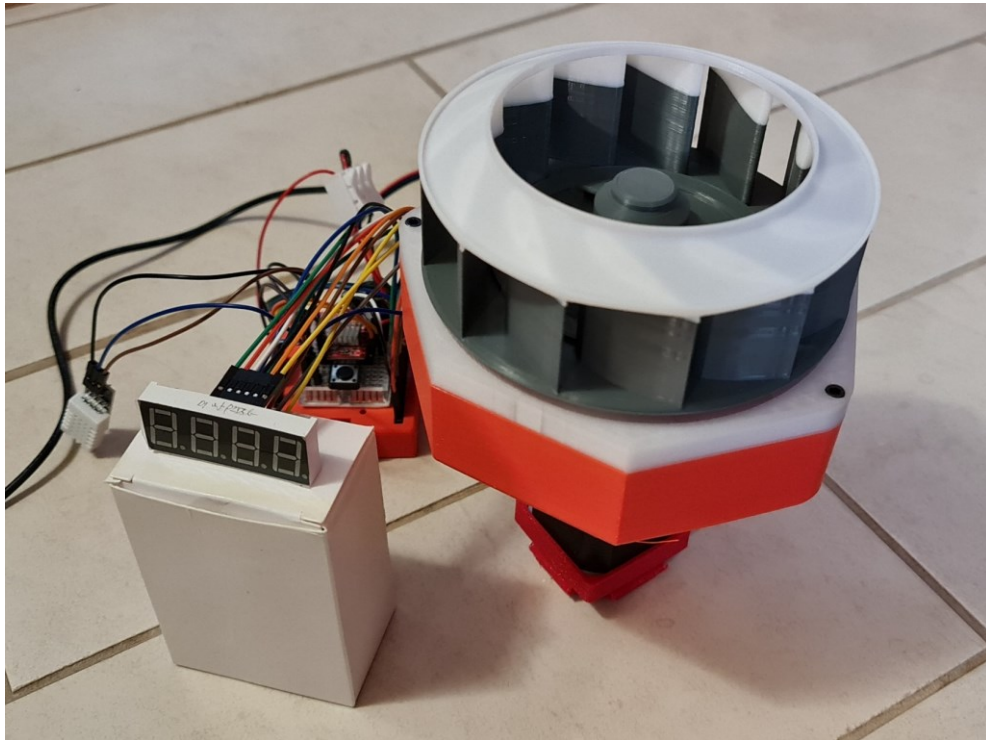


Obr. 39: Laboratórne váhy KERN použité na meranie stratenej hmotnosti

9.1 Vlastnosti merania

Všetky merania okrem prvého, na ktorom boli stanovované materiály funkčných prvkov a časové úseky, prebiehali po dobu šiestich hodín, s meraním hmotnosti vzoriek každú hodinu. Rýchlosť otáčania hriadeľa motora bola 428 otáčok za minútu a rýchlosť ventilátora pri prevodovom pomere $1:0,3\bar{3}$ bola 142 otáčok za minútu.

Po hodine opotrebovávania v mechanizme bol krokový motor automaticky vypnutý a mechanizmus rozobraný. Uvoľnený materiál, ktorý sa nachádzal na vzorkách, bol pred každým meraním oprášeny štetcom. Následne bolo každé planetárne koleso zvážené 10-krát na laboratórnych váhach a aritmetický priemer bol vložený do grafu.



Obr. 40: Zostavený testovací mechanizmus

9.2 Miera opotrebenia v závislosti od materiálov funkčných prvkoch pre povrchovo neupravené vzorky

Pri testovaní a ladení mechanizmu pred začiatkom samotného merania bolo pozorované, že opotrebenie meraných planetárnych kolies úzko súvisí s materiálom pastorku a vnútorného ozubeného kolesa. Keďže sú laboratórne váhy obmedzené v rozlíšiteľnosti, bolo nutné dosiahnuť čo najvyššieho opotrebenia na získanie čo najpresnejších výsledkov. Z tohto dôvodu boli zvolené dva odlišné materiály na testovanie opotrebenia, v závislosti na materiáli funkčných prvkoch. Prvým bol PLA, tvrdý ale krehký materiál. Druhým bol CPE, mäkkší a húževnatejší materiál.

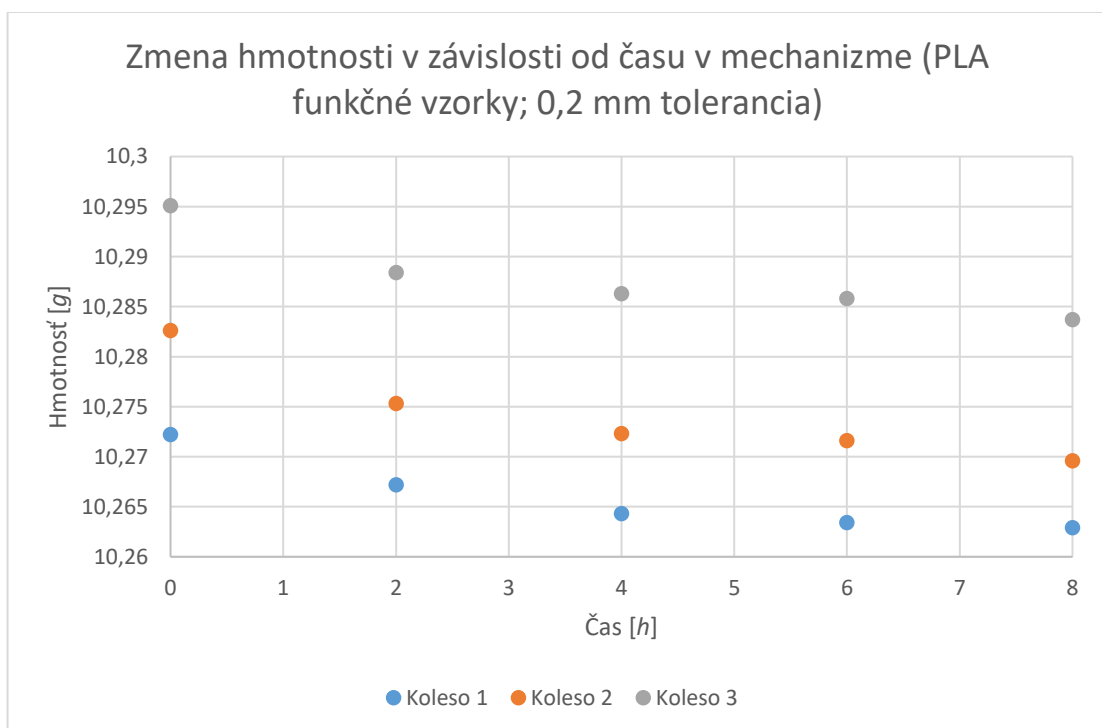
Počas prvých meraní boli taktiež sledované hodnoty opotrebenia pastorku a vnútorného ozubeného kolesa, aby bola zaručená správnosť nameraných dát počas celého merania. Z týchto meraní bolo zistené, že ich opotrebenie je zanedbateľné.

9.2.1 PLA

V tomto experimente sa ešte spresňoval čas merania. Celkové meranie trvalo 8 hodín, každé 2 hodiny boli telesá očistené a vážené na laboratórnych váhach. Keďže všetky ostatné merania trvali 6 hodín, ostatné výsledky boli porovnávané so stratenou hmotnosťou po 6 hodinách opotrebovania v mechanizme.

Tabuľka 1: Hmotnosť a stratená hmotnosť vzoriek v závislosti od času v mechanizme pre funkčné vzorky z PLA a toleranciu 0,2 mm

Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,2722	10,2826	10,2951	-	-	-
2	10,2672	10,2753	10,2884	5,0	7,3	6,7
4	10,2643	10,2723	10,2863	2,9	3,0	2,1
6	10,2634	10,2716	10,2858	0,9	0,7	0,5
8	10,2629	10,2696	10,2837	0,5	2,0	2,1
Celková stratená hmotnosť [mg]				9,3	13,0	11,4
Odchýlka [mg]				1,79	2,48	2,32



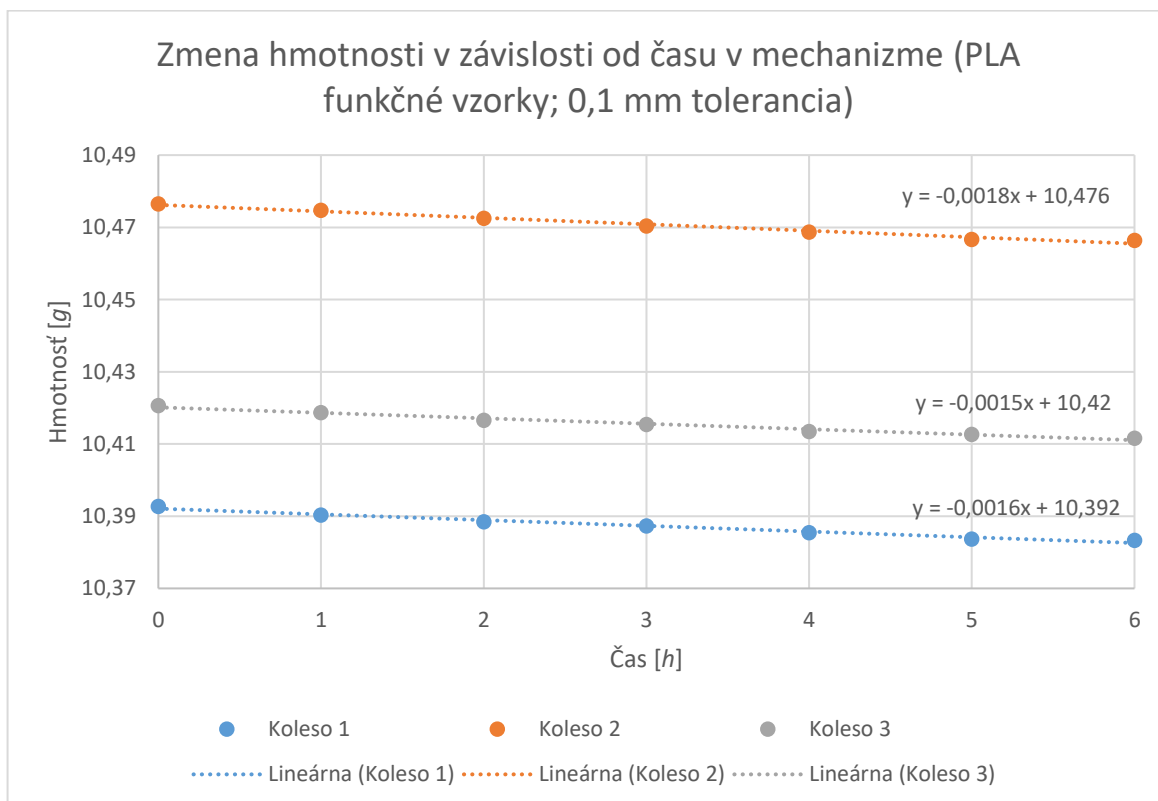
Graf 1: Zmena hmotnosti v čase pri použití PLA materiálu pre funkčné vzorky a toleranciu 0,2 mm

Zmena hmotnosti jednotlivých vzoriek pre toleranciu 0,2 mm v čase vyzerá byť exponenciálna alebo polynomickejšia. Z tohto dôvodu nebolo toto meranie preložené lineárnou regresiou.

Rozdiely hmotnosti medzi vzorkami sú spôsobené aditívnou technológiou. Môžu vzniknúť napr. pri nerovnej podložke v jednom mieste, nekonštantným priemerom filamentu, nerovnomernou extrúziou krokového motoru atď.

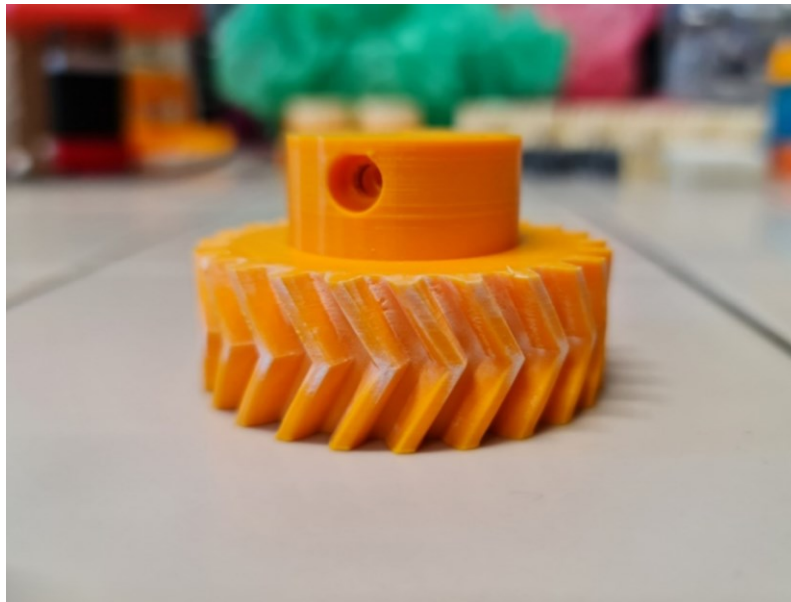
Tabuľka 2: Hmotnosť a stratená hmotnosť vzoriek v závislosti od času v mechanizme pre funkčné vzorky z PLA a toleranciu 0,1 mm

Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,3927	10,4765	10,4207	-	-	-
1	10,3903	10,4747	10,4187	2,4	1,8	2,0
2	10,3885	10,4725	10,4166	1,8	2,2	2,1
3	10,3873	10,4704	10,4154	1,2	2,1	1,2
4	10,3855	10,4687	10,4135	1,8	1,7	1,9
5	10,3837	10,4667	10,4127	1,8	2,0	0,8
6	10,3833	10,4664	10,4116	0,4	0,3	1,1
Celková stratená hmotnosť [mg]				9,4	10,1	9,1
Odchýlka [mg]				0,63	0,64	0,50



Graf 2: Zmena hmotnosti v čase pri použití PLA materiálu pre funkčné vzorky a toleranciu 0,1 mm

Pri tolerancii 0,1 mm medzi ozubenými kolesami je v grafe vidno lineárnu stratu materiálu počas doby celého merania. V porovnaní s toleranciou 0,2 mm je hmotnosť strateného materiálu nižšia.



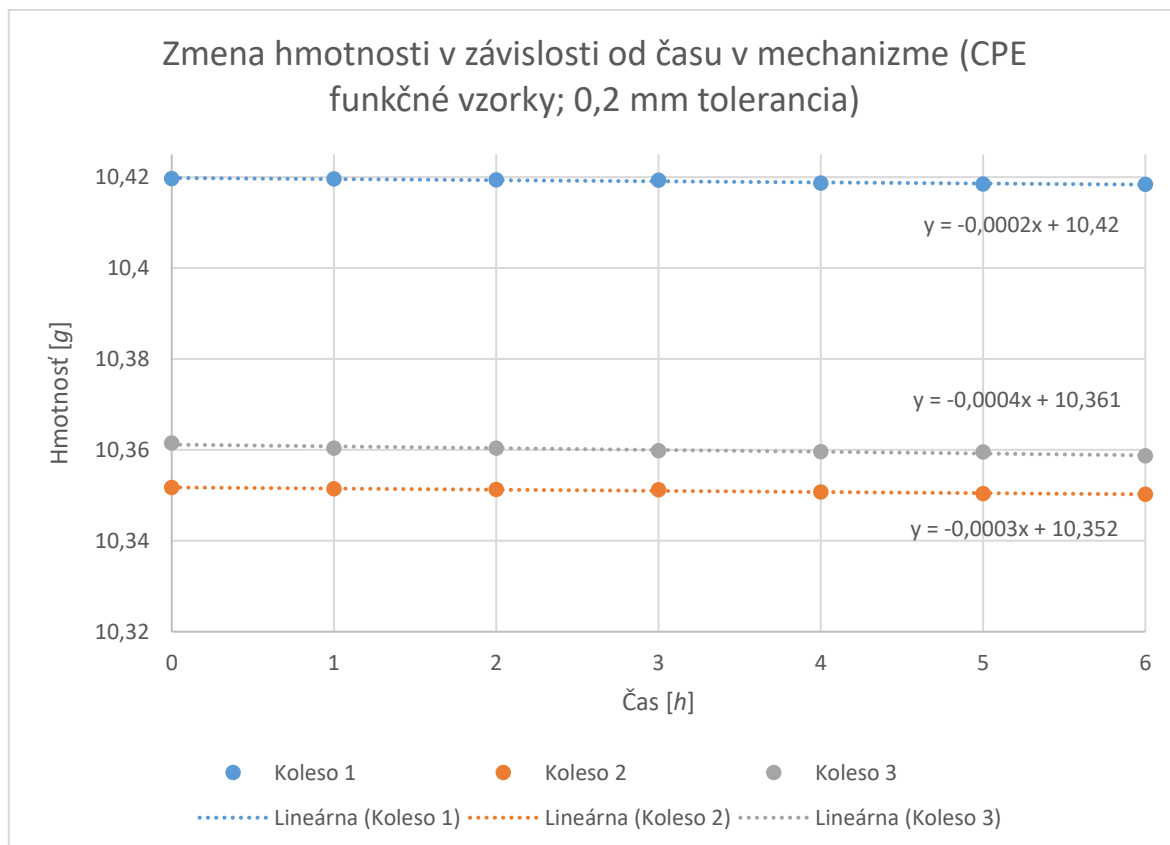
Obr. 41: PLA pastorok s naneseným opotrebeným materiálom na ozubení

9.2.2 CPE

CPE bol pôvodne navrhnutý ako materiál pre funkčné prvky prevodového testovacieho mechanizmu, vďaka jeho odolnosti proti opotrebeniu. Je to húževnatý materiál vyrábaný modifikáciou materiálu PETG. Pri testovaní bola ale pozorovaná nízka stratená hmotnosť. Túto vlastnosť bolo nutné overiť pri kontrolovanom meraní. Výsledky z týchto meraní sú v tabuľkách 3 a 4 a v grafoch 3 a 4.

Tabuľka 3: Hmotnosť a stratená hmotnosť vzoriek v závislosti od času v mechanizme pre funkčné vzorky z CPE a toleranciu 0,2 mm

Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,4197	10,3517	10,3615	-	-	-
1	10,4196	10,3514	10,3604	0,1	0,3	1,1
2	10,4194	10,3513	10,3604	0,2	0,1	0,0
3	10,4193	10,3512	10,3598	0,1	0,1	0,6
4	10,4187	10,3507	10,3596	0,6	0,5	0,2
5	10,4185	10,3504	10,3595	0,2	0,3	0,1
6	10,4184	10,3502	10,3587	0,1	0,2	0,8
Celková stratená hmotnosť [mg]				1,3	1,5	2,8
Odchýlka [mg]				0,18	0,14	0,40

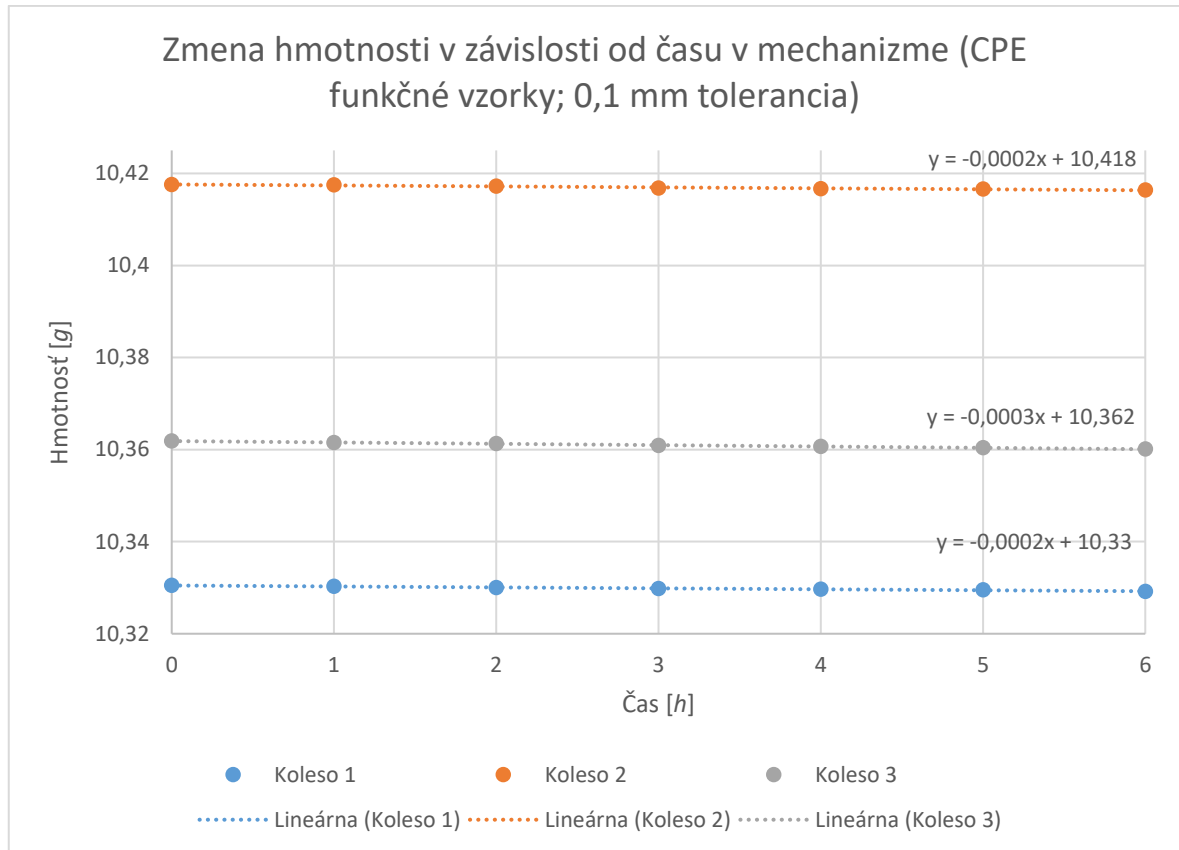


Graf 3: Zmena hmotnosti v čase pri použití CPE materiálu pre funkčné vzorky a toleranciu 0,2 mm

Už z týchto výsledkov je možné vidieť drastickú redukciu strateného materiálu v porovnaní s PLA materiálom. Pri meraní bolo ale zaznamenané zníženie hlučnosti mechanizmu, čo môže byť spôsobené mäkkosťou CPE materiálu.

Tabuľka 4: Hmotnosť a stratená hmotnosť vzoriek v závislosti od času v mechanizme pre funkčné vzorky z CPE a toleranciu 0,1 mm

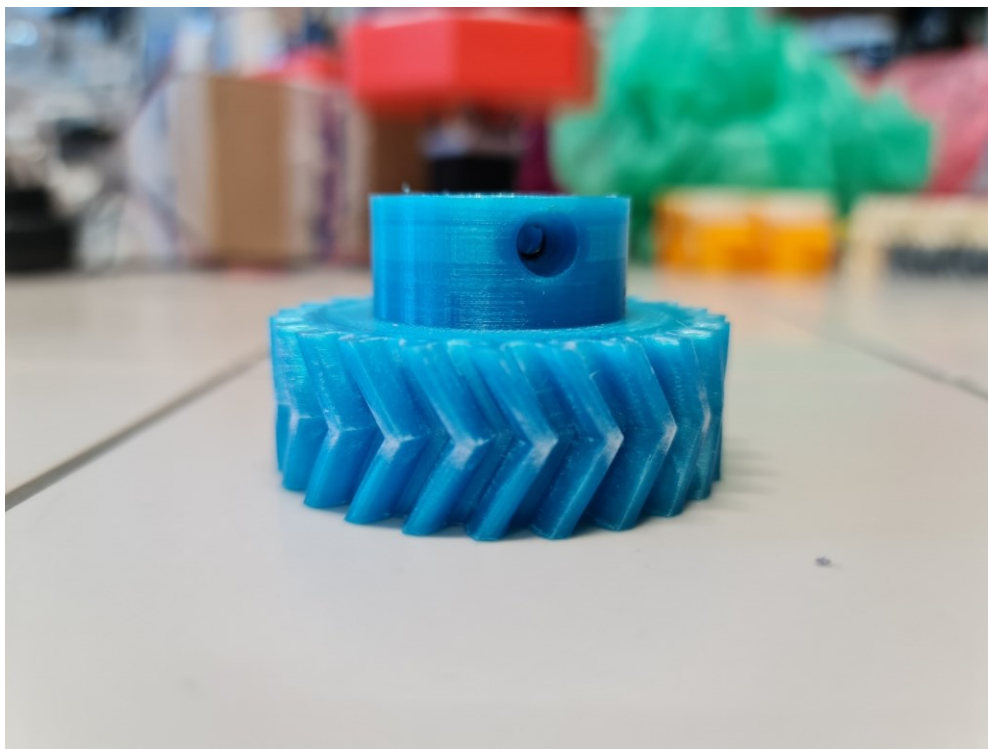
Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,3305	10,4176	10,3619	-	-	-
1	10,3303	10,4175	10,3615	0,2	0,1	0,4
2	10,3300	10,4172	10,3613	0,3	0,3	0,2
3	10,3298	10,4168	10,3609	0,2	0,4	0,4
4	10,3297	10,4167	10,3607	0,1	0,1	0,2
5	10,3295	10,4166	10,3604	0,2	0,1	0,3
6	10,3292	10,4164	10,3601	0,3	0,2	0,3
Celková stratená hmotnosť [mg]				1,3	1,2	1,8
Odchýlka [mg]				0,07	0,12	0,08



Graf 4: Zmena hmotnosti v čase pri použití CPE materiálu pre funkčné vzorky a toleranciu 0,1 mm

Z výsledkov hodnôt celkovej stratenej hmotnosti a z rovníc lineárnej regresie v grafoch 3 a 4 je vidno, že opotrebenie v prípade použitia materiálu CPE je približne 10-krát menšie ako v prípade použitia PLA materiálu. Straty materiálu boli tak malé, že rozlíšiteľnosť najmenšieho dielika na váhach môže spôsobiť značné nepresnosti. Z tohto dôvodu boli pre ostatné merania vo zvyšku tejto práce použité funkčné prvky z PLA materiálu.

Teoreticky by bolo možné dosiahnuť ešte vyšších hodnôt opotrebenia použitím tvrdších a abrazívnejších materiálov, ako napr. nylon plnený uhlíkovými alebo sklenenými vláknami.



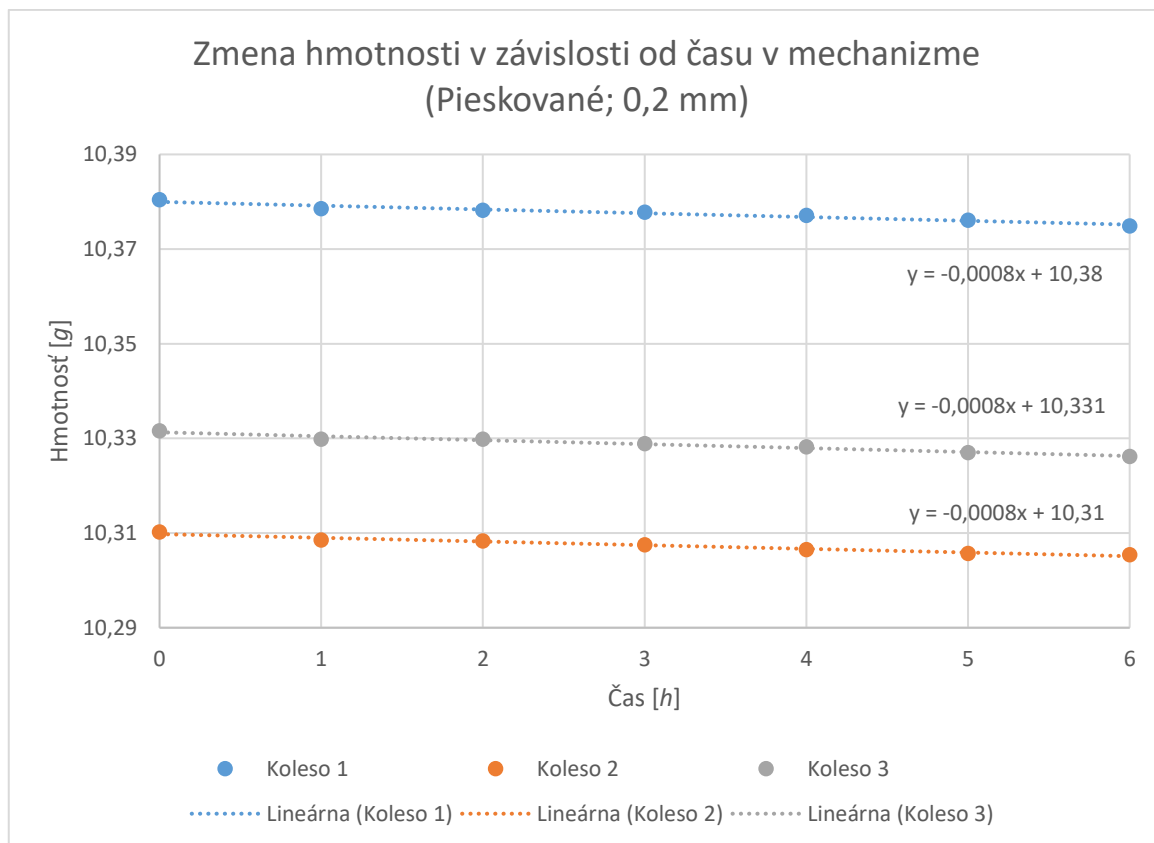
Obr. 42: CPE pastorok s naneseným opotrebeným materiálom na ozubení

9.3 Opatrebenie pieskovaných vzoriek

Ako ďalšie boli testované pieskované vzorky. Po pieskovaní boli prefúknuté stlačeným vzduchom, aby boli odstránené zvyšky abrazívneho materiálu z procesu pieskovania, ktoré by mohli ovplyvniť výsledky merania.

Tabuľka 5: Hmotnosť a stratená hmotnosť pieskovaných vzoriek v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,2 mm

Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,3804	10,3102	10,3316	-	-	-
1	10,3785	10,3085	10,3298	1,9	1,7	1,8
2	10,3782	10,3083	10,3298	0,3	0,2	0,0
3	10,3778	10,3075	10,3289	0,4	0,8	0,9
4	10,3771	10,3065	10,3282	0,7	1,0	0,7
5	10,3761	10,3057	10,3270	1,0	0,8	1,2
6	10,3749	10,3054	10,3262	1,2	0,3	0,8
Celková stratená hmotnosť [mg]				5,5	4,8	5,4
Odchýlka [mg]				0,54	0,49	0,54

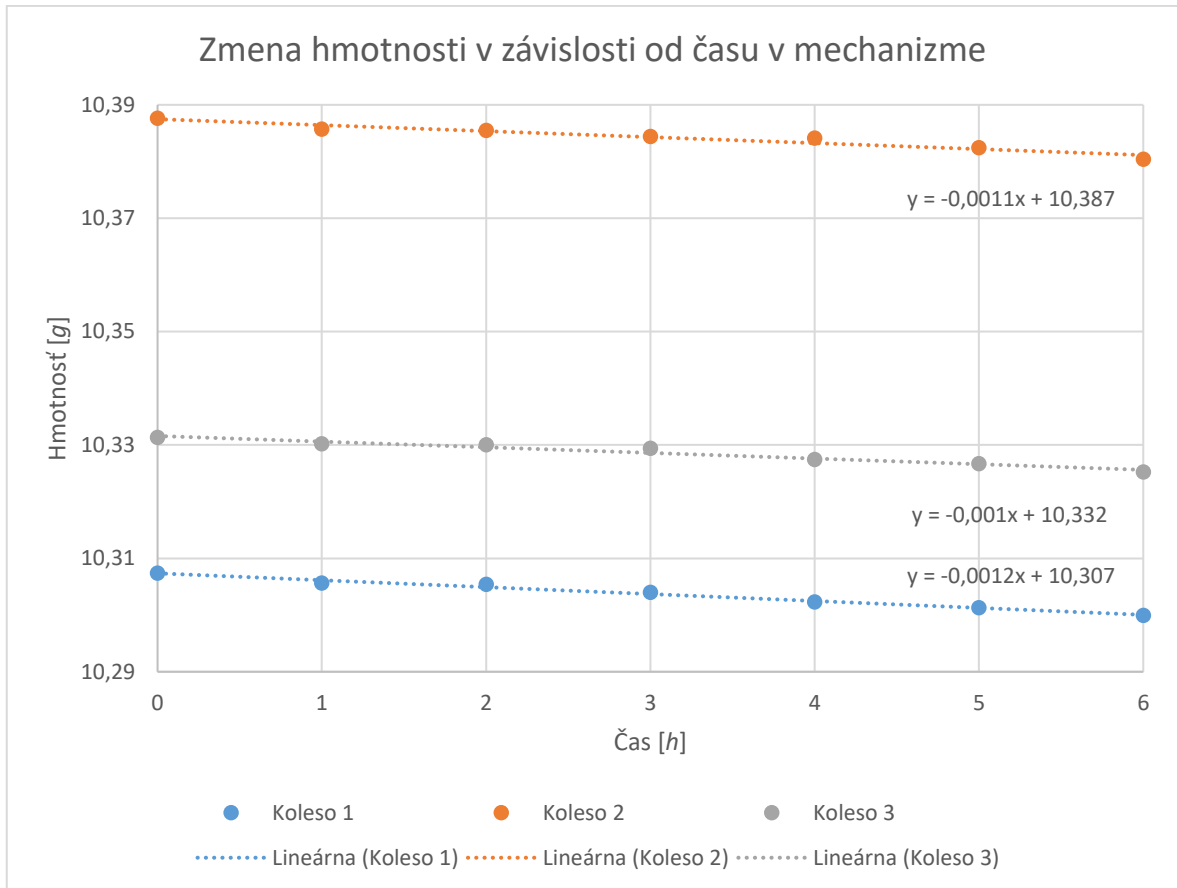


Graf 5: Zmena hmotnosti v čase pieskovaných vzoriek s toleranciou 0,2 mm

Je možné pozorovať približne 50 % redukciu v množstve opotrebeného materiálu pri tejto tolerancii.

Tabuľka 6: Hmotnosť a stratená hmotnosť pieskovaných vzoriek v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,1 mm

Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,3074	10,3876	10,3313	-	-	-
1	10,3056	10,3857	10,3302	1,8	1,9	1,1
2	10,3054	10,3855	10,3300	0,2	0,2	0,2
3	10,3040	10,3844	10,3294	1,4	1,1	0,6
4	10,3023	10,3841	10,3274	1,7	0,3	2,0
5	10,3013	10,3824	10,3267	1,0	1,7	0,7
6	10,2999	10,3804	10,3252	1,4	2,0	1,5
Celková stratená hmotnosť [mg]				7,5	7,2	6,1
Odchýlka [mg]				0,53	0,73	0,60



Graf 6: Zmena hmotnosti v čase pieskovaných vzoriek s toleranciou 0,1 mm

Opotrebenie pieskovaných vzoriek oproti vzorkám neupraveným bolo síce nižšie, približne o 31 %, ale nebola zaznamenaná až taká výrazná zmena, ako u vzoriek s toleranciou 0,2 mm. Taktiež strata materiálu u vzoriek s toleranciou 0,1 mm bola vyššia ako u vzoriek s toleranciou 0,2 mm. Táto zmena mohla byť zapríčinená nerovnomerným pieskovaním, keďže samotné pieskovanie nebolo robené kontrolovaným robotom, ale človekom.



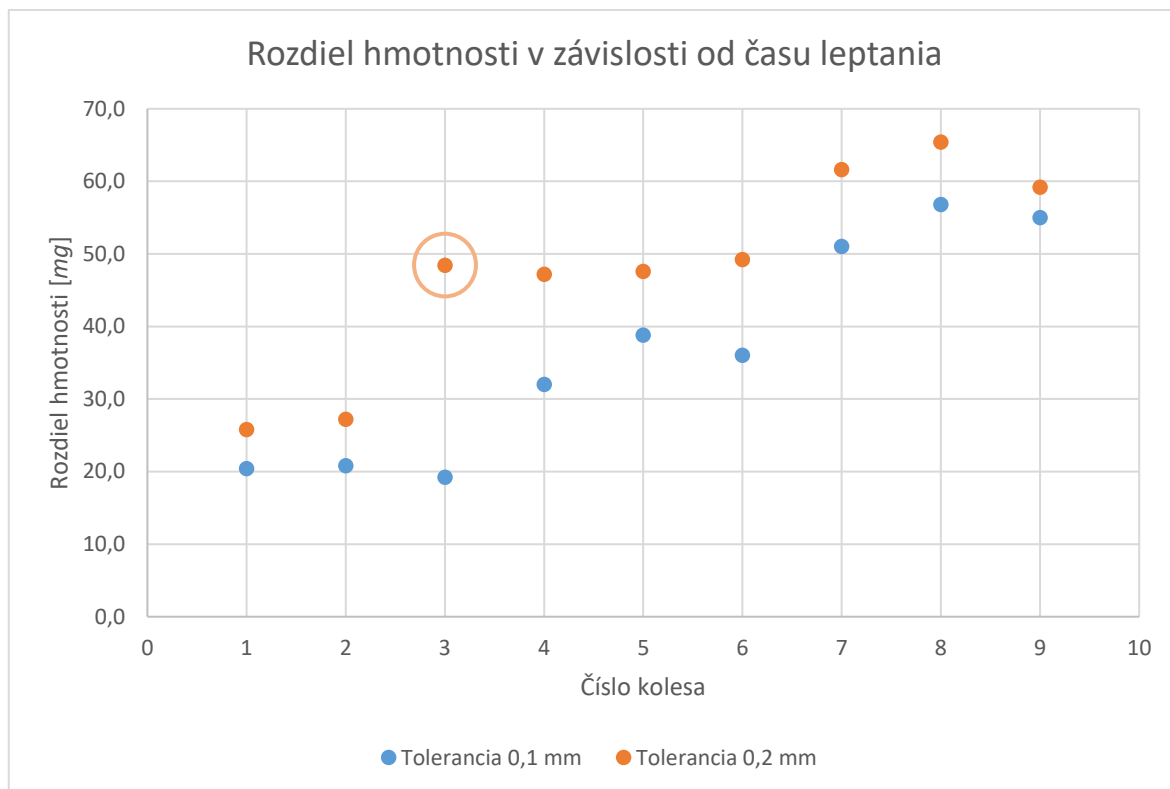
Obr. 43: Opotrebená vzorka pieskovaného planetárneho ozubeného koleša
Pri porovnaní obr. 41 s obr. 35 je vidno, že opotrebenie spôsobilo čiastočné vyhladenie povrchu planetárneho koleša na miestach dotyku ozubených kolies.

9.4 Opotrebenie leptaných vzoriek

Leptaním sa vytvorí na povrchu vzorky tenký povlak rozleptaného plastu. Leptanie je charakteristické vysokým leskom a hladkým povrchom na dotyk. Hypotéza bola, že vytvorený povlak zvýši odolnosť proti opotrebeniu v závislosti na dĺžke leptania.

9.4.1 Zmena hmotnosti v závislosti na čase leptania

Ešte pred samotným leptaním bolo každé planetárne koleso označené a odvážené. Následne boli vzorky leptané a rozdelené do troch skupín podľa času, ktorý strávili v nádobe s acetónovými výparmi (leptací čas). Boli sušené po dobu jedného dňa na vzduchu. Po vysušení bola znova každá vzorka odvážená na zistenie zmeny hmotnosti v závislosti od leptacieho času.



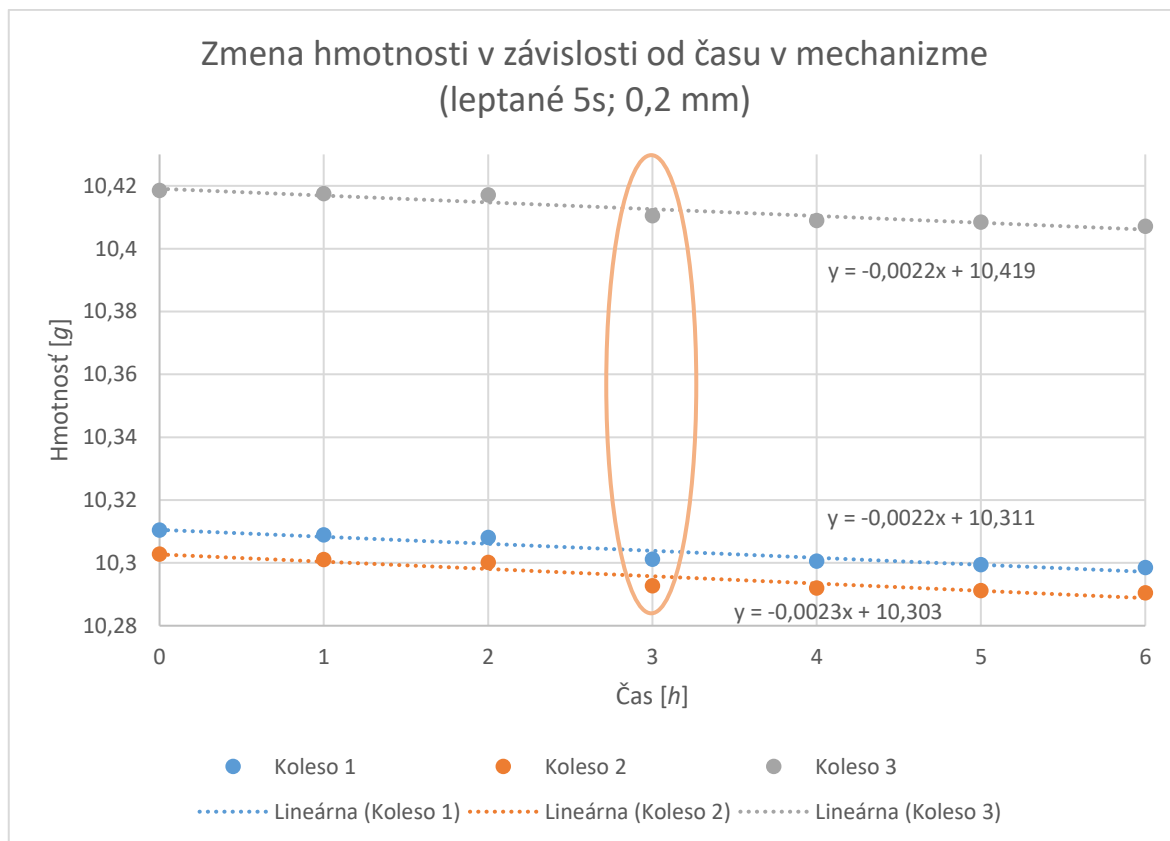
Graf 7: Rozdiel hmotnosti v závislosti od času leptania

Z grafu 7 sa dá vyčítať, že dlhší čas leptania spôsobil značné zvýšenie hmotnosti. Je ľahké rozpoznať 3 skupiny rozdelené podľa leptacieho času. Výnimku tvorí koleso č. 3 s toleranciou 0,2 mm. Zjavne došlo k hrubej chybe pri leptaní a omylom bolo toto teleso leptané po dobu 10 sekúnd namiesto 5 sekúnd. V ostatných prípadoch sú si hmotnosti všetkých skupín veľmi podobné.

9.4.2 Opatrenie vzoriek leptaných 5 sekúnd

Tabuľka 7: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (5s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,2 mm

Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,3104	10,3028	10,4185	-	-	-
1	10,3089	10,3010	10,4175	1,5	1,8	1,0
2	10,3081	10,3001	10,4171	0,8	0,9	0,4
3	10,3011	10,2927	10,4105	7,0	7,4	6,6
4	10,3005	10,2920	10,4089	0,6	0,7	1,6
5	10,2994	10,2912	10,4084	1,1	0,8	0,5
6	10,2985	10,2904	10,4071	0,9	0,8	1,3
Celková stratená hmotnosť [mg]				11,9	12,4	11,4
Odchýlka [mg]				2,26	2,41	2,14

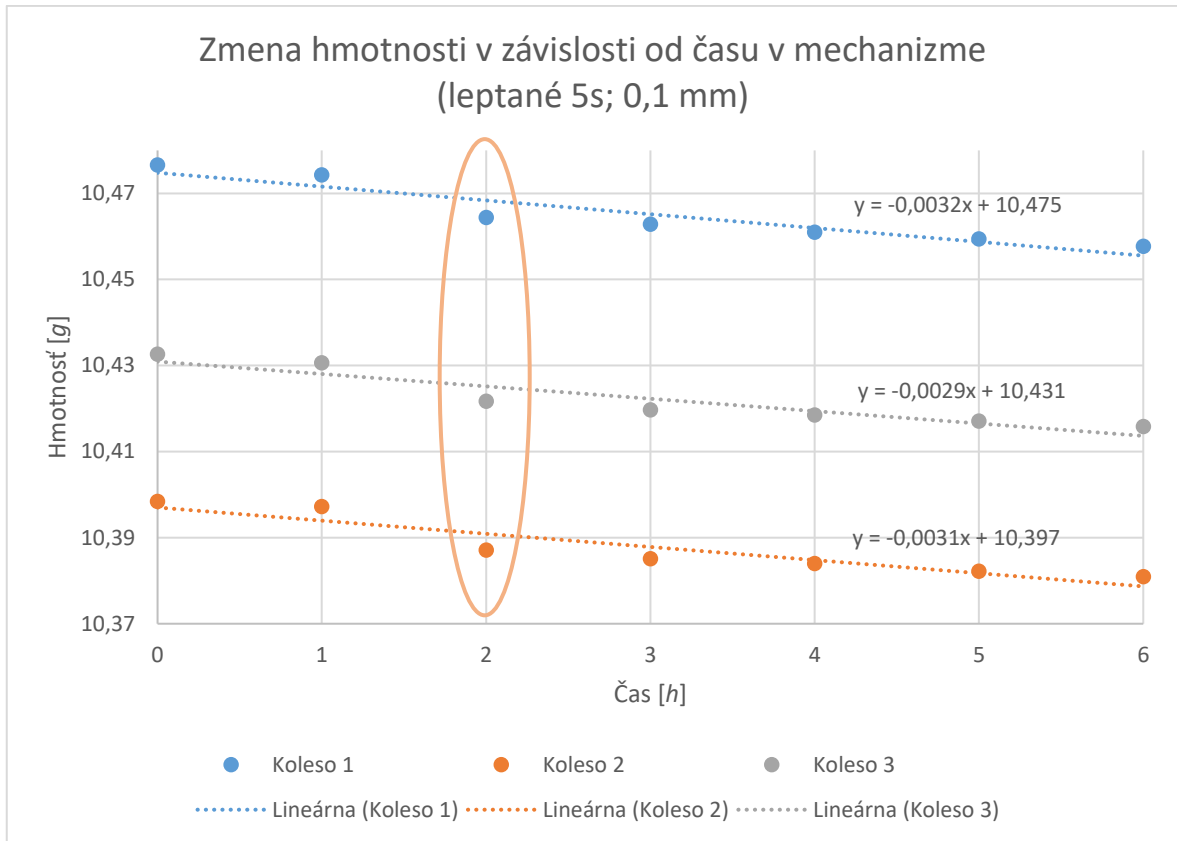


Graf 8: Zmena hmotnosti v čase leptaných (5s) vzoriek s toleranciou 0,2 mm

Celková stratená hmotnosť je pre leptané vzorky s leptacím časom 5 sekúnd s toleranciou 0,2 mm porovnateľná so stratenou hmotnosťou neupravených vzoriek.

Tabuľka 8: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (5s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,1 mm

Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,4766	10,3984	10,4326	-	-	-
1	10,4743	10,3972	10,4306	2,3	1,2	2,0
2	10,4644	10,3871	10,4217	9,9	10,1	8,9
3	10,4628	10,3851	10,4197	1,6	2,0	2,0
4	10,4610	10,3840	10,4185	1,8	1,1	1,2
5	10,4594	10,3822	10,4171	1,6	1,8	1,4
6	10,4577	10,3809	10,4158	1,7	1,3	1,3
Celková stratená hmotnosť [mg]				18,9	17,5	16,8
Odchýlka [mg]				3,03	3,23	2,75



Graf 9: Zmena hmotnosti v čase leptaných (5s) vzoriek s toleranciou 0,1 mm

V obidvoch skupinách vzoriek došlo k neočakávanému správaniu. Pri vzorkách s toleranciou 0,2 mm došlo za jednu hodinu opotrebovania k strate materiálu, ktorý zodpovedal vyše 40 % z celkovej straty materiálu po šiestich hodinách. Podobne pri vzorkách s toleranciou 0,1 mm došlo k strate viac ako 50 % z celkovej straty materiálu. Je pravdepodobné, že toto anomálne správanie môže byť výsledkom porušenia tenkej leptanej vrstvy, pod ktorou sa nachádzal mäkkší materiál. Túto hypotézu potvrdzuje fakt, že toto správanie môžeme pozorovať pri obidvoch meraniach v približne rovnakom čase.



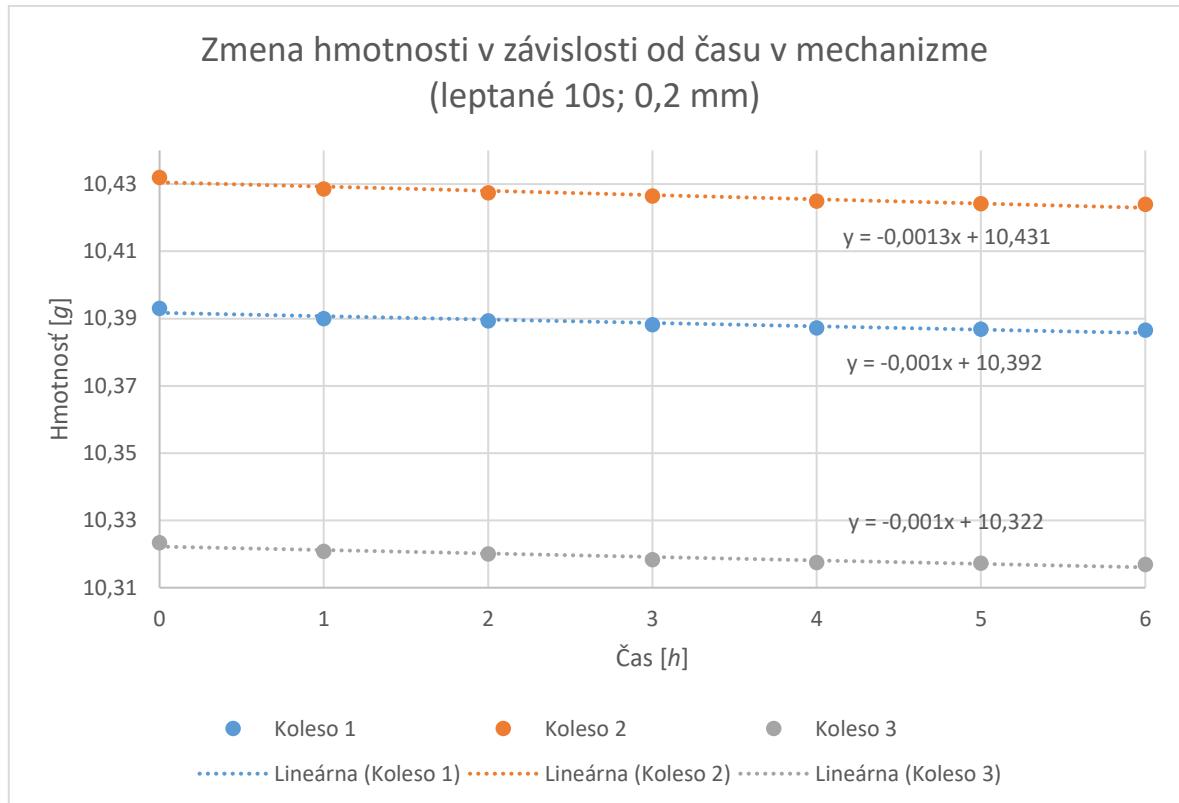
Obr. 44: Opotrebená vzorka leptaného planetárneho ozubeného koleša

U opotrebených leptaných vzoriek je možné pozorovať vzniknuté nerovnosti, ktoré sú ľahko viditeľné pod svetlom. Zvýšila sa ich drsnosť a znížila sa lesklosť.

9.4.3 Opotrebenie vzoriek leptaných 10 sekúnd

Tabuľka 9: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (10s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,2 mm

Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,3930	10,4319	10,3233	-	-	-
1	10,3900	10,4285	10,3208	3,0	3,4	2,5
2	10,3893	10,4274	10,3200	0,7	1,1	0,8
3	10,3882	10,4264	10,3183	1,1	1,0	1,7
4	10,3872	10,4249	10,3174	1,0	1,5	0,9
5	10,3868	10,4241	10,3173	0,4	0,8	0,1
6	10,3865	10,4239	10,3169	0,3	0,2	0,4
Celková stratená hmotnosť [mg]				6,5	8,0	6,4
Odchýlka [mg]				0,90	1,00	0,81

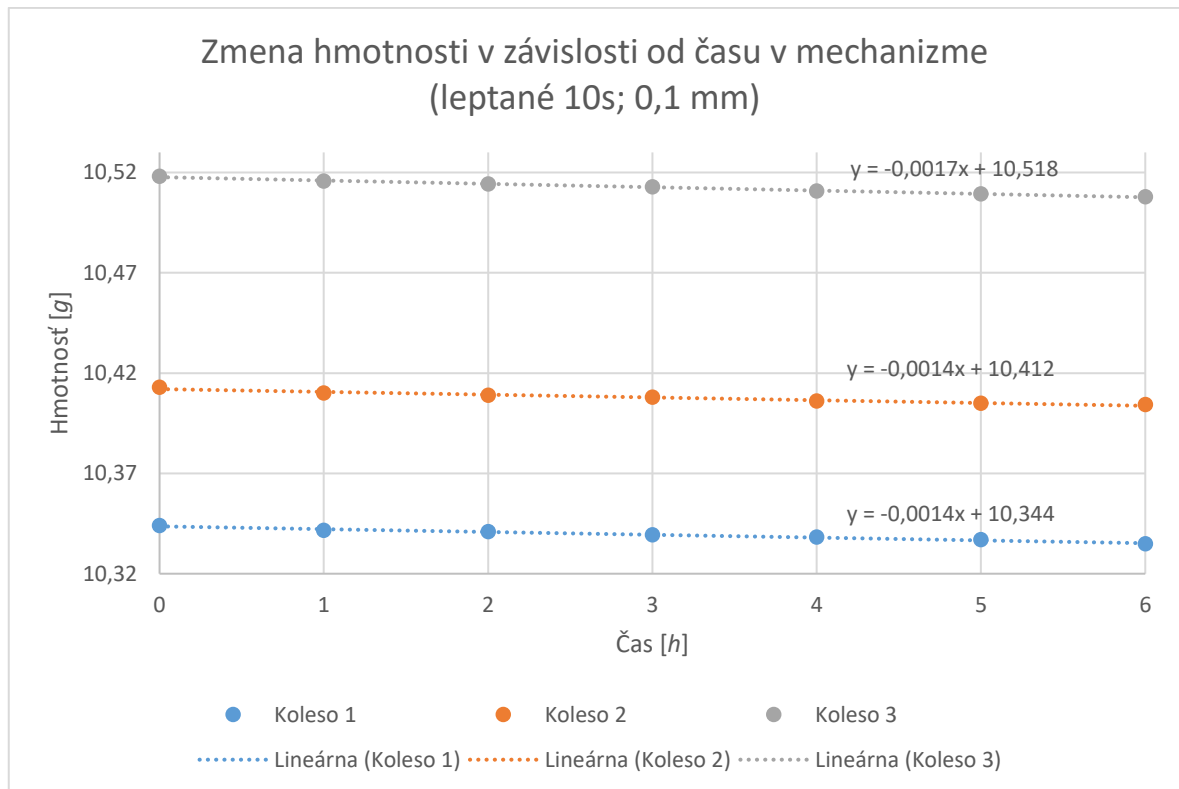


Graf 10: Zmena hmotnosti v čase leptaných (10s) vzoriek s toleranciou 0,2 mm

Oproti vzorkám, ktoré boli leptané 5 sekúnd je možné pozorovať drastickú redukciu hmotnosti strateného materiálu.

Tabuľka 10: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (10s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,1 mm

Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,3440	10,4129	10,5180	-	-	-
1	10,3415	10,4100	10,5157	2,5	2,9	2,3
2	10,3409	10,4089	10,5142	0,6	1,1	1,5
3	10,3393	10,4080	10,5128	1,6	0,9	1,4
4	10,3383	10,4060	10,5108	1,0	2,0	2,0
5	10,3370	10,4049	10,5093	1,3	1,1	1,5
6	10,3348	10,4043	10,5078	2,2	0,6	1,5
Celková stratená hmotnosť [mg]				9,2	8,6	10,2
Odchýlka [mg]				0,66	0,78	0,33



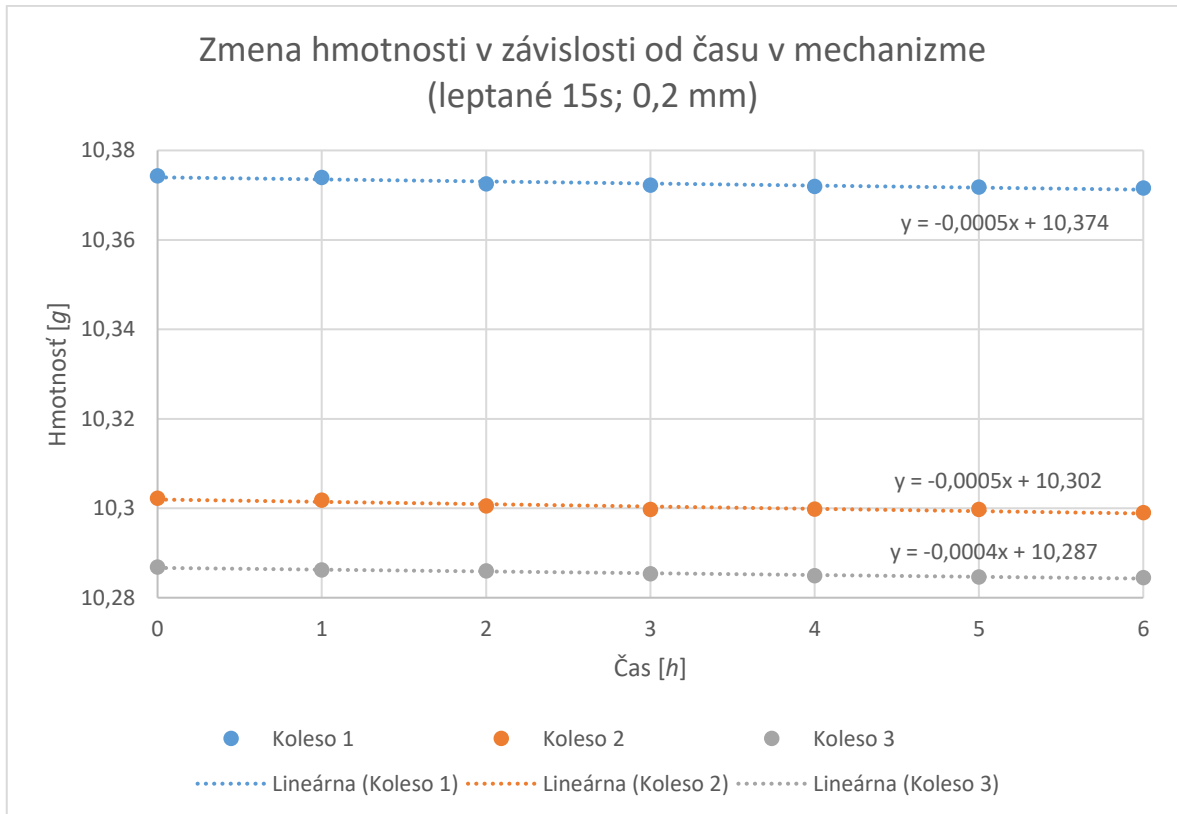
Graf 11: Zmena hmotnosti v čase leptaných (10s) vzoriek s toleranciou 0,1 mm

V porovnaní s leptanými vzorkami s leptacím časom 5 sekúnd už nenastala prudká strata materiálu v danom meracom čase. Toto bolo pravdepodobne spôsobené hrubšou vrstvou naleptaného plastu. Pri porovnaní s referenčnými vzorkami, ktoré nemali upravený povrch, bola pri tolerancii 0,2 mm pozorovaná vyššia odolnosť proti opotrebeniu. Naopak pri tolerancii 0,1 mm nebola pozorovaná veľká zmena hmotnosti strateného materiálu.

9.4.4 Opatrenie vzoriek leptaných 15 sekúnd

Tabuľka 11: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (15s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,2 mm

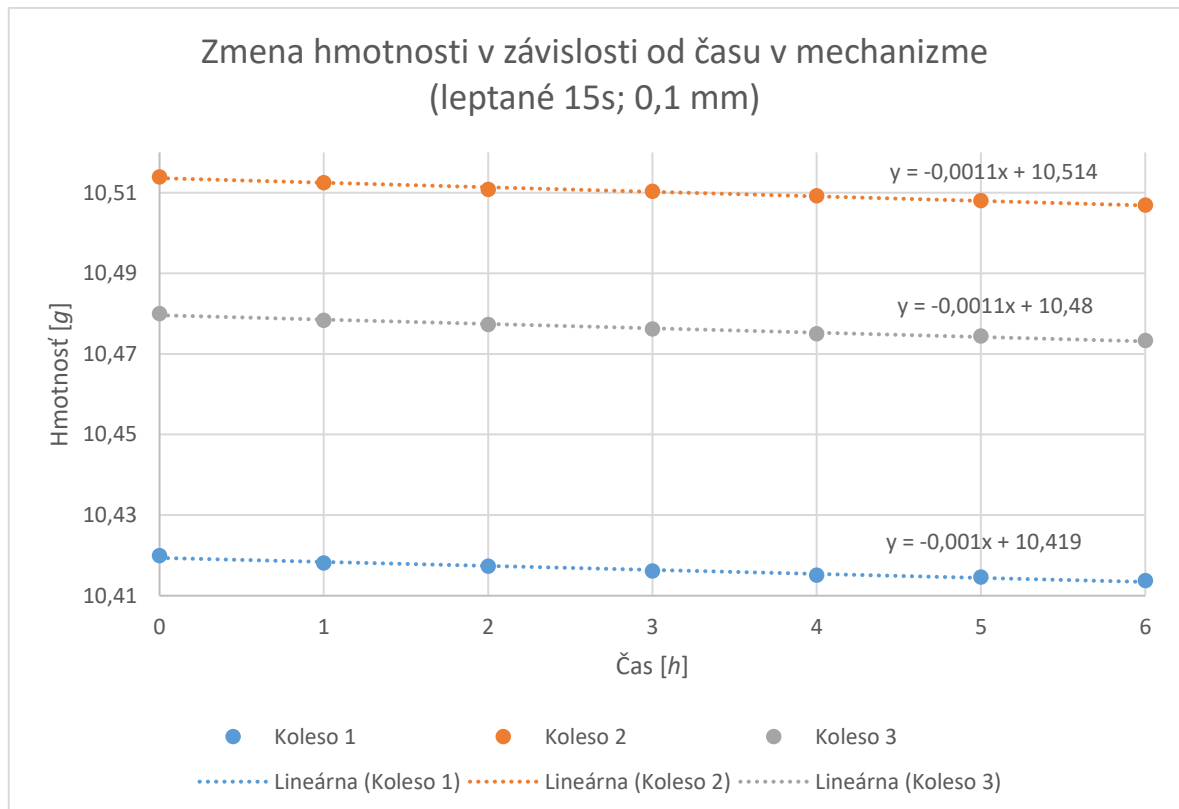
Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,3743	10,3022	10,2868	-	-	-
1	10,3739	10,3018	10,2862	0,4	0,4	0,6
2	10,3725	10,3005	10,2860	1,4	1,3	0,2
3	10,3722	10,2997	10,2853	0,3	0,8	0,7
4	10,3719	10,2996	10,2849	0,3	0,1	0,4
5	10,3718	10,2995	10,2846	0,1	0,1	0,3
6	10,3716	10,2990	10,2845	0,2	0,5	0,1
Celková stratená hmotnosť [mg]				2,7	3,2	2,3
Odchýlka [mg]				0,43	0,42	0,21



Graf 12: Zmena hmotnosti v čase leptaných (15s) vzoriek s toleranciou 0,2 mm

Tabuľka 12: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (15s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,1 mm

Čas [h]	Hmotnosť [g]			Stratená hmotnosť [mg]		
	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3	Koleso 1	Koleso 2	Koleso 3
0	10,4199	10,5139	10,4800	-	-	-
1	10,4181	10,5125	10,4783	1,8	1,4	1,7
2	10,4173	10,5108	10,4773	0,8	1,7	1,0
3	10,4161	10,5103	10,4762	1,2	0,5	1,1
4	10,4151	10,5092	10,4750	1,0	1,1	1,2
5	10,4146	10,5080	10,4744	0,5	1,2	0,6
6	10,4137	10,5069	10,4733	0,9	1,1	1,1
Celková stratená hmotnosť [mg]				6,2	7,0	6,7
Odchýlka [mg]				0,40	0,36	0,32



Graf 13: Zmena hmotnosti v čase leptaných (15s) vzoriek s toleranciou 0,2 mm

U vzoriek, ktoré boli leptané po dobu 15 sekúnd nastali veľké rozdiely medzi toleranciami. Pri tolerancii 0,2 mm je najnižšie opotrebenie zo všetkých prevedených povrchových úprav, zatiaľ čo u tolerancie 0,1 mm je stratená hmotnosť zhruba 2-krát väčšia. Tento rozdiel môže byť spôsobený pridaným materiálom, ktorý vznikol pri leptaní. Vzorky s toleranciou 0,2 mm mali dostatočne veľké miesto na umiestnenie tohto materiálu, takže v mechanizme sa dotykové plochy presne stýkali na plochách zubov. Naopak pri tolerancii 0,1 mm nastal prebytočný náber materiálu, ktorý sa opotrebil rýchlejšie, a tým bola strata materiálu za rovnaký časový úsek asi o 50 % väčšia.

9.5 Celkový čas merania a prípravy praktickej časti

Tabuľka 13: Celkový čas merania praktickej časti

Úkon	Približný čas [h]
Návrh mechanizmu	4
Zostavenie mechanizmu a ladenie	2
Tlač vzoriek	110
Opotrebovanie a meranie	122
Pieskovanie	1
Leptanie	1
Celkový čas merania	130 hodín

Pri spočítaní všetkých úkonov, ktoré bolo nutné vykonať v praktickej časti tejto bakalárskej práce, vyjde celkový čas merania na približne 130 hodín práce. Dôvod, prečo sa jednoducho nedajú sčítať všetky zložky merania je, že vo väčšine prípadov prebiehala tlač a opotrebovávanie paralelne. Tým je reálny čas skrátenej o takmer 100 hodín.

Samotné povrchové úpravy tvoria malé percento z celkového času. Pri pieskovaní bola každá vzorka pieskovaná po dobu 60 sekúnd, pričom celkový proces aj s oprášením od zvyškového abrazíva a vymenením vzorky trval približne 2 minúty. Pri leptaní bola dlhšia príprava, aby bola zabezpečená správna výška acetónovej vrstvy v sklenenej nádobe pre rovnomerné leptanie povrchu. Samotné leptanie vzoriek trvalo relatívne krátko.

10 DISKUSIA VÝSLEDKOV

Pri meraní hmotnosti ozubených planetárnych kolies, ktoré neboli povrchovo upravené, bolo zistené, že použitím mäkšieho a húževnatejšieho materiálu (CPE) pre pastorok a vnútorné ozubené koleso, sa hodnota opotrebenia vyjadrená ako hmotnosť strateného materiálu zmenší približne 10-násobne v porovnaní s použitím PLA materiálu pre tieto funkčné časti.

U pieskovaných vzoriek s toleranciou 0,2 mm bolo možné pozorovať 54 % redukciu v množstve strateného materiálu oproti vzorkám bez povrchovej úpravy. Pre vzorky s toleranciou 0,1 mm bola redukcia približne 30 %.

Leptané vzorky s leptacím časom 5 sekúnd vykazovali anomálne správanie. Pri obidvoch hodnotách tolerancií bola zaznamenaná veľká strata materiálu počas jednej hodiny opotrebovania v mechanizme. Konkrétne pri tolerancii 0,2 mm tvorila strata za jednu hodinu asi 40 % celkového opotrebeného materiálu; pri tolerancii 0,1 mm bola táto hodnota okolo 50 %. Je možné, že z dôvodu krátkeho leptacieho času sa na povrchu nestihla vytvoriť dostatočne hrubá vrstva naleptaného plastu a po opotrebení tejto tenkej vrstvy bola odhalená oveľa mäkšia vrstva materiálu, ktorá tak dobre neodolávala opotrebeniu. Celkové opotrebenie pre obidve tolerancie bolo takmer 2-krát vyššie ako u referenčných vzoriek.

Vzorky s leptacím časom 10 sekúnd toto zvláštne správanie nevykazovali. Je možné, že s dostatočne dlhým časom merania by k tomu správaniu došlo. Pri porovnaní s referenčnými vzorkami bola sledovaná zvýšená odolnosť voči opotrebeniu o 30% pri vzorkách s toleranciou 0,2 mm. Vzorky s toleranciou 0,1 mm mali stratu materiálu podobnú so vzorkami bez povrchových úprav.

Najmenšie hodnoty opotrebenia z celého experimentu (okrem použitia CPE materiálu) boli namerané pre vzorky s leptacím časom 15 sekúnd a toleranciou 0,2 mm. Tieto vzorky mali hodnoty veľmi blízke tým, ktoré boli namerané pri použití CPE materiálu pre funkčné prvky mechanizmu. Oproti referenčným hodnotám sa opotrebenie zmenšilo až o 73 %. Vzorky s toleranciou 0,1 mm takéto veľké redukcie nezaznamenali, konkrétne len o 31 %.

Vplyv tolerancie počas celého merania je zaujímavý. Pri použití vzoriek bez povrchovej úpravy bolo vidno, že hodnota opotrebenia je nižšia pre kolesá s toleranciou 0,1 mm ako s toleranciou 0,2 mm a to približne o 10 %. Toto správanie sa ale úplne zmenilo pri vzorkách s akoukoľvek povrchovou úpravou. V týchto prípadoch je opotrebenie vzoriek s toleranciou 0,1 mm väčšie, a to v rozmedzí od 25 % do 60 %.

ZÁVER

Táto bakalárska práca porovnáva mieru opotrebenia ozubených kolies v mechanizme planetárneho prevodu. Teoretická časť obsahuje proces vytvorenia meraných vzoriek pomocou 3D tlače, vlastnosti rôznych materiálov, rozdiely medzi nimi a základy do tribológie – vede o opotrebovaní materiálov. Nakoniec sú vypísané možnosti dokončovacích prác na dieloch vytvorených aditívnou technológiou.

Praktická časť obsahuje spôsob, akým bol postavený testovací mechanizmus a ako boli určené podmienky merania. Ďalej opisuje rozdelenie prvkov do jednotlivých meraných skupín, z ktorých je každá opracovaná inou povrchovou úpravou. Tieto skupiny boli vkladané do testovacieho mechanizmu a skúmané na opotrebenie. Je viacero spôsobov, ako zaznamenávať opotrebenie. V tejto práci je použitá metóda stratenej hmotnosti – hmotnosť, o ktorú vzorka prišla počas daného časového úseku.

Z výsledkov merania sa dá určiť, že veľmi záleží na materiáli prvkov, ktoré sa v danom mechanizme pohybujú. Pri použití nevhodných materiálov sa môže opotrebenie niekoľkonásobne zvýšiť. Pri metóde pieskovania bola zaznamenaná významná redukcia miery opotrebenia. Naopak pri metóde leptania pre vzorky s leptacím časom 5 sekúnd došlo k neočakávanému správaniu a opotrebenie bolo vyššie ako u referenčných vzoriek. Tento dej by bolo nutné pozorovať a študovať aj v budúcnosti. Najmenšie opotrebenie, okrem použitia materiálu CPE pre funkčné prvky, dosiahli vzorky, ktoré boli leptané najdlhšie, a to 15 sekúnd. Ich opotrebenie bolo zredukované až do 73 % voči referenčným vzorkám.

Vplyv tolerancie počas celého merania bol nerovnomerný. Pri vzorkách bez úpravy povrchu boli hodnoty opotrebenia nižšie pri tolerancii 0,1 mm. Keď boli planetárne kolesá povrchovo upravené, či už pieskovaním alebo leptaním, vždy boli vzorky s toleranciou 0,2 mm odolnejšie voči opotrebovaniu. Na vyjadrenie presnejšieho záveru by bolo nutné túto charakteristiku študovať aj naďalej.

Z týchto poznatkov je možné usúdiť, že prevedením správnej povrchovej úpravy na častiach mechanizmu sa zníži miera opotrebenia, konkrétne kombináciou pieskovania a leptania, pričom leptací čas musí byť minimálne 10 až 15 sekúnd.

Celé meranie praktickej časti trvalo približne 130 hodín, pričom tlač vzoriek a opotrebovávanie v mechanizme boli robené paralelne.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY

- [1] GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Munich: Hanser Publishers, [2016], xx, 591 s. ISBN 9781569905821.
- [2] SAVINI, A. a G.G. SAVINI. A short history of 3D printing, a technological revolution just started. In: 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON) [online]. IEEE, 2015. ISBN 978-1-5090-0065-4. Dostupné z: doi:10.1109/HISTELCON.2015.7307314
- [3] DESHMUKH, Kalim, SADASIVUNI, Kumar Kishor a Mariam AlAli ALMAADEED, ed. 3D and 4D printing of polymer nanocomposite materials: processes, applications, and challenges. Amsterdam: Elsevier, 2020, xvii, 573 s. ISBN
- [4] SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN, ed. Additive manufacturing: innovations, advances, and applications. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016], xv, 444 s. ISBN 9781498714778.
- [5] Materiály - 3dfactory.cz. Úvod - 3dfactory.cz [online]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/11/02/materialy/>
- [6] 3D Printing Materials | MakerBot. 3D Printers for Educators & Professionals | MakerBot [online]. Copyright © 2009 [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/stories/design/3d-printing-materials/>
- [7] IBEH, Christopher C. Thermoplastic materials: properties, manufacturing methods, and applications. Boca Raton, FL: CRC Press, [2011], 1 online zdroj (xxiii, 616 stran). Dostupné z: doi:9780429150968
- [8] BIRON, Michel. Thermoplastics and thermoplastic composites. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier/WA, 2013, 1 online zdroj (xxvii, 1044 pages). PDL handbook series. ISBN 9781455730353. Dostupné také z: <https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpTTCE0001>
- [9] ABS. Simplify3D Software | All-In-One 3D Printing Software [online]. Copyright © Simplify3D [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/abs/>

- [10] Polycarbonate. Simplify3D Software | All-In-One 3D Printing Software [online]. Copyright © Simplify3D [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/polycarbonate/>
- [11] Nylon. Simplify3D Software | All-In-One 3D Printing Software [online]. Copyright © Simplify3D [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/nylon/>
- [12] Carbon Fiber Filled. Simplify3D Software | All-In-One 3D Printing Software [online]. Copyright © Simplify3D [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/carbon-fiber-filled/>
- [13] PETRESCU, Rely Victoria V., Raffaella AVERSA, Antonio APICELLA, MirMilad MIRSAYAR a Florian Ion T. PETRESCU. About the Gear Efficiency to a Simple Planetary Train. American Journal of Applied Sciences [online]. 2016, 13(12), 1428-1436 [cit. 2021-11-17]. ISSN 1546-9239. Dostupné z: doi:10.3844/ajassp.2016.1428.1436
- [14] GOMÀ AYATS, J.R., U. DIEGO-AYALA, J. MINGUELLA CANELA, F. FENOLLOSA a J. VIVANCOS. Hypergraphs for the analysis of complex mechanisms comprising planetary gear trains and other variable or fixed transmissions. Mechanism and Machine Theory [online]. 2012, 51, 217-229 [cit. 2021-11-17]. ISSN 0094114X. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmachtheory.2011.07.011
- [15] VOLEK, František. Základy konstruování a části strojů I. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 167 s. ISBN 9788073186548.
- [16] COLLINS, Danielle. Why are planetary gearboxes preferred for servo applications?. Linear Motion Tips [online]. Copyright © 2022 · WTW Media, 2019, 8.1. 2019 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/why-are-planetary-gearboxes-preferred-for-servo-applications/>
- [17] Planetary Gear Systems. SHREWSBURY MACHINE & GEAR. SMC Gears [online]. © 2020 Shrewsbury Machine & Gear [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://smcgears.com/products-manufactured/planetary-reducer/>
- [18] Spur Gears. Science Direct [online]. Copyright © Elsevier B.V. [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/spur-gears>

- [19] Gear Types Archive. Tec Science [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.tec-science.com/category/mechanical-power-transmission/gear-types/>
- [20] GUPTA, Kapil; JAIN, Neelesh Kumar; LAUBSCHER, R. F. Advanced gear manufacturing and finishing: classical and modern processes. 2017. ISBN 9780128045060
- [21] CHILDS, Peter R. N. Mechanical design engineering handbook. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0080977591.
- [22] Guide to surface finishing for 3D-printed parts. SPC | Surface Treatment Experts [online]. Emigsville, PA, USA, 2017 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.sharrettsplating.com/blog/guide-surface-finishing-3d-printed-parts/>
- [23] How to surface finish 3D printed parts. C-Mac Industries [online]. South Windsor NSW, Australia: Copyright @ C-Mac Industries, 2019 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.cmac.com.au/blog/how-to-surface-finish-3d-printed-parts>
- [24] Finishing and Painting 3D Printed Parts. Markforged [online]. Copyright © 2021 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/blog/painting-3d-printed-parts>
- [25] Sandblasting. Science Direct [online]. Copyright © Elsevier B.V. [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/sandblasting>
- [26] KENIMER, Brian. 4 best shop practices for abrasive blasting. The Fabricator [online]. 2018 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/finishing/4-best-shop-practices-for-abrasive-blasting>
- [27] Can You Sandblast 3D Prints? M3D Zone [online]. 2021 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://m3dzone.com/can-you-sandblast-3d-prints/>
- [28] GAO, Harry, Dorcas V. KAWEESA, Jacob MOORE a Nicholas A. MEISEL. Investigating the Impact of Acetone Vapor Smoothing on the Strength and Elongation of Printed ABS Parts. JOM [online]. 2017, 69(3), 580-585 [cit. 2021-11-17]. ISSN 1047-4838. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-016-2214-5
- [29] SINK, Andrew. Building an Acetone Vapor Bath for Smoothing 3D-Printed Parts. Sinkhacks [online]. 2014 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <http://sinkhacks.com/building-acetone-vapor-bath-smoothing-3d-printed-parts/>

- [30] KOČÍ, Jakub. How to improve your 3D prints with annealing. Prusa Printers Blog [online]. Copyright © Prusa Research, 2019 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/how-to-improve-your-3d-prints-with-annealing_31088/
- [31] How Annealing Makes Your 3D Prints Better. Fargo 3D Printing [online]. Copyright © Fargo 3D Printing, 2017 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.fargo3dprinting.com/annealing-makes-3d-prints-better/>
- [32] AFFATATO, Saverio. Tribological interactions of modern biomaterials used in total hip arthroplasty (THA). Perspectives in Total Hip Arthroplasty [online]. Elsevier, 2014, 2014, [cit. 2021-11-17]. ISBN 9781782420316. Dostupné z: [doi:10.1533/9781782420392.2.99](https://doi.org/10.1533/9781782420392.2.99)
- [33] CHATTOPADHYAY, Ramnarayan. Surface Wear: Analysis, Treatment, and Prevention. ASM International, 2001, 318 s. ISBN 978-1-61503-060-6.
- [34] Friction, Lubrication, and Wear JEYAPRAKASH, Natarajan a Che-Hua YANG. Friction, Lubrication, and Wear. PATNAIK, Amar, Tej SINGH a Vikas KUKSHAL, ed. Tribology in Materials and Manufacturing - Wear, Friction and Lubrication [online]. IntechOpen, 2021, 2021-2-3 [cit. 2021-11-17]. ISBN 978-1-83880-557-9. Dostupné z: [doi:10.5772/intechopen.93796](https://doi.org/10.5772/intechopen.93796)
- [35] BLAŠKOVITŠ, Pavel, Marián DZIMKO a Jozef BALLA. Tribológia. Bratislava: Alfa, 1990. Edícia strojárскеj literatúry (Alfa). ISBN 80-05-00633-0.
- [36] TSUJIMOTO, Akimasa, Wayne W. BARKMEIER, Nicholas G. FISCHER, Kie NOJIRI, Yuko NAGURA, Toshiki TAKAMIZAWA, Mark A. LATTA a Masashi MIAZAKI. Wear of resin composites: Current insights into underlying mechanisms, evaluation methods and influential factors. Japanese Dental Science Review [online]. 2018, 54(2), 76-87 [cit. 2021-11-17]. ISSN 18827616. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jdsr.2017.11.002](https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2017.11.002)
- [37] KANDEVA-IVANOVA, Mara, Aleksandar VENCL a Dimitar KARASTOYANOV. Advanced Tribological Coatings for Heavy-Duty Applications: Case Studies. Sofia: Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Science, 2016, 145 s. ISBN 978-954-322-858-4.

- [38] Handbook of Materials Failure Analysis UPADHYAY, Ram K. a Lakshmi A. KUMARASWAMIDHAS. Bearing failure issues and corrective measures through surface engineering. Handbook of Materials Failure Analysis [online]. Elsevier, 2018, 2018, s. 209-233 [cit. 2021-11-17]. ISBN 9780081019283. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-101928-3.00011-2
- [39] BOGDANOVICH, P. N. Fatigue wear of materials under dynamic contact loading. Journal of Friction and Wear [online]. 2013, 34(5), 349-357 [cit. 2021-11-23]. ISSN 1068-3666. Dostupné z: doi:10.3103/S1068366613050036
- [40] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

%	- Percento
°C	- Stupeň Celzia
°	- Stupeň
s	- Sekunda
h	- Hodina
mg	- Miligram
g	- Gram
µm	- Mikrometer
mm	- Milimeter
ml	- Mililiter
3D	- Trojrozmerný priestor
ABS	- Akrylonitrilbutadiénstyrén
CAD	- Computer Aided Design (projektovanie pomocou počítača)
CPE	- Kopolymér kyseliny tereftalovej
DLP	- Digital Light Processing (digitálne spracovanie svetla)
DMD	- Digital Mirroring Device (digitálne zariadenie na zrkadlenie svetla)
DVD	- Digital Video Disc (digitálny video disk)
FDM	- Fused Deposition Modeling (výroba depozíciou taveniny termoplastu)
FLM	- Fused Layer Modeling (výroba spájaním vrstiev)
LERV	- Litorypsia extrakorporálnou rázovou vlnou
LOM	- Laminated Object Manufacturing (výroba objektov lamináciou)
PC	- Polykarbonát
PET	- Polyetyléntereftalát
PETG	- Polyetyléntereftalát modifikovaný glykolom
PLA	- Kyselina polymliečna

PVA	- Polyvinylalkohol
SLA	- Stereolitografia
SLS	- Selective Laser Sintering (selektívne natavovanie laserom)
STL	- Standard Transformation Language (jazyk štandardnej transformácie)
TPU	- Termoplastický polyuretán

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1: Princíp LOM tlače [1]</i>	12
<i>Obr. 2: Rozdelenie 3D výrobku na vrstvy o rovnakej hrúbke [1]</i>	13
<i>Obr. 3: Stavba FLM tlačiarne [3]</i>	14
<i>Obr. 4: Stavba SLA tlačiarne [3]</i>	15
<i>Obr. 5: Stavba DLP tlačiarne [1]</i>	16
<i>Obr. 6: Stavba SLS tlačiarne [1]</i>	17
<i>Obr. 7: Princíp SLS tlače [1]</i>	19
<i>Obr. 8: LEGO kocky vyrobené aditívnou technológiou z ABS [9]</i>	20
<i>Obr. 9: Skoba vyrobená z PC [10]</i>	22
<i>Obr. 10: Rýchlosvorka na káble vyrobená z nylonu [11]</i>	23
<i>Obr. 11: Modelové lietadlo vyrobené z filamentu plneného uhlíkovými vláknami [12]</i>	24
<i>Obr. 12: Planetárna prevodovka [16][17]</i>	25
<i>Obr. 13: Čelné súkolie s a) priamymi zubami b) šípovými zubami [19]</i>	26
<i>Obr. 14: Kuželové súkolie s a) priamymi zubami b) zakrivenými zubami [19]</i>	27
<i>Obr. 15: Šnekové súkolie [19]</i>	28
<i>Obr. 16: Obrusovanie výrobku brúsnyim papierom [24]</i>	29
<i>Obr. 17: Diagram metódy pieskovania [26]</i>	30
<i>Obr. 18: Výrobok pred (pravá strana) a po (ľavá strana) vyhladení acetónovými parami [29]</i>	31
<i>Obr. 19: Porovnanie povrchu (v smere osi z) materiálu PLA pred (pravá strana) a po žíhaní (ľavá strana) [30]</i>	32
<i>Obr. 20: Deformácia rôznych materiálov pri rôznych teplotách žíhania [30]</i>	32
<i>Obr. 21: Abrazívne opotrebenie a) dvojtelesové b) trojtelesové [36]</i>	34
<i>Obr. 22: Adhezívne opotrebenie [36]</i>	34
<i>Obr. 23: Erozívne opotrebenie a) časticami nesenými v prúde kvapaliny b) časticami nesenými v prúde plynu c) prúdom kvapaliny [35]</i>	35
<i>Obr. 24: Korozívne opotrebenie [36]</i>	36
<i>Obr. 25: Únavové opotrebenie [36]</i>	36
<i>Obr. 26: Kavitačné opotrebenie a) mechanizmus kolapsu bubliny plynu b) jamka zanechaná kolapsom bubliny v indiu</i>	37
<i>Obr. 27: Návrh sústavy v programe Fusion 360</i>	39
<i>Obr. 28: Usporiadanie ozubených kolies</i>	40
<i>Obr. 29: Nefunkčné súčiastky</i>	41
<i>Obr. 30: Funkčné súčiastky z PLA filamentu</i>	42
<i>Obr. 31: Merané ozubené kolesá z ABS filamentu na tlačiarňi Průša Mini+</i>	43

<i>Obr. 32: Riadiaci obvod na ovládanie krokového motora Nema 17</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 33: Grafické zobrazenie tolerancie medzi ozubenými kolesami</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 34: Povrch neupraveného planetárneho kolesa</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 35: Pieskový box Unicraft SSK3 (naľavo) a abrazivo Maxi-Blast CK2 (napravo) .</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 36: Povrch planetárneho kolesa po 60 sekundách pieskovania.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 37: Sklenená nádoba na leptanie</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 38: Povrch planetárneho kolesa po 60 sekundách pieskovania a 15 sekundách leptania</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 39: Laboratórne váhy KERN použité na meranie stratenej hmotnosti</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 40: Zostavený testovací mechanizmus.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 41: PLA pastorok s naneseným opotrebeným materiálom na ozubení</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 42: CPE pastorok s naneseným opotrebeným materiálom na ozubení</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 43: Opotrebená vzorka pieskovaného planetárneho ozubeného kolesa</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 44: Opotrebená vzorka leptaného planetárneho ozubeného kolesa</i>	<i>65</i>

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tabuľka 1: Hmotnosť a stratená hmotnosť vzoriek v závislosti od času v mechanizme pre funkčné vzorky z PLA a toleranciu 0,2 mm</i>	53
<i>Tabuľka 2: Hmotnosť a stratená hmotnosť vzoriek v závislosti od času v mechanizme pre funkčné vzorky z PLA a toleranciu 0,1 mm</i>	54
<i>Tabuľka 3: Hmotnosť a stratená hmotnosť vzoriek v závislosti od času v mechanizme pre funkčné vzorky z CPE a toleranciu 0,2 mm</i>	55
<i>Tabuľka 4: Hmotnosť a stratená hmotnosť vzoriek v závislosti od času v mechanizme pre funkčné vzorky z CPE a toleranciu 0,1 mm</i>	56
<i>Tabuľka 5: Hmotnosť a stratená hmotnosť pieskovaných vzoriek v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,2 mm</i>	58
<i>Tabuľka 6: Hmotnosť a stratená hmotnosť pieskovaných vzoriek v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,1 mm</i>	59
<i>Tabuľka 7: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (5s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,2 mm</i>	62
<i>Tabuľka 8: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (5s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,1 mm</i>	63
<i>Tabuľka 9: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (10s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,2 mm</i>	65
<i>Tabuľka 10: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (10s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,1 mm</i>	66
<i>Tabuľka 11: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (15s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,2 mm</i>	67
<i>Tabuľka 12: Hmotnosť a stratená hmotnosť leptaných vzoriek (15s) v závislosti od času v mechanizme s toleranciou 0,1 mm</i>	68
<i>Tabuľka 13: Celkový čas merania praktickej časti</i>	69

ZOZNAM GRAFOV

<i>Graf 1: Zmena hmotnosti v čase pri použití PLA materiálu pre funkčné vzorky a toleranciu 0,2 mm.....</i>	<i>53</i>
<i>Graf 2: Zmena hmotnosti v čase pri použití PLA materiálu pre funkčné vzorky a toleranciu 0,1 mm.....</i>	<i>54</i>
<i>Graf 3: Zmena hmotnosti v čase pri použití CPE materiálu pre funkčné vzorky a toleranciu 0,2 mm.....</i>	<i>56</i>
<i>Graf 4: Zmena hmotnosti v čase pri použití CPE materiálu pre funkčné vzorky a toleranciu 0,1 mm.....</i>	<i>57</i>
<i>Graf 5: Zmena hmotnosti v čase pieskovaných vzoriek s toleranciou 0,2 mm</i>	<i>59</i>
<i>Graf 6: Zmena hmotnosti v čase pieskovaných vzoriek s toleranciou 0,1 mm</i>	<i>60</i>
<i>Graf 7: Rozdiel hmotnosti v závislosti od času leptania.....</i>	<i>62</i>
<i>Graf 8: Zmena hmotnosti v čase leptaných (5s) vzoriek s toleranciou 0,2 mm</i>	<i>63</i>
<i>Graf 9: Zmena hmotnosti v čase leptaných (5s) vzoriek s toleranciou 0,1 mm</i>	<i>64</i>
<i>Graf 10: Zmena hmotnosti v čase leptaných (10s) vzoriek s toleranciou 0,2 mm</i>	<i>66</i>
<i>Graf 11: Zmena hmotnosti v čase leptaných (10s) vzoriek s toleranciou 0,1 mm</i>	<i>67</i>
<i>Graf 12: Zmena hmotnosti v čase leptaných (15s) vzoriek s toleranciou 0,2 mm</i>	<i>68</i>
<i>Graf 13: Zmena hmotnosti v čase leptaných (15s) vzoriek s toleranciou 0,2 mm</i>	<i>69</i>

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha P I: Materiálový list pre Prusament PLA filament

Príloha P II: Materiálový list pre Fillamentum ABS filament

PRÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST PRE PRUSAMENT PLA FILAMENT

Version: 1.0

Last update: 20-09-2018

PRUSA
POLYMERS
by JOSEF PRUSA

TECHNICAL DATA SHEET Prusament PLA by Prusa Polymers



PLA is the most commonly used filament. It's biodegradable, easy to print, and very strong. The perfect choice for printing large objects thanks to its low thermal expansion (little to no warping) and for printing tiny parts because of its low melting temperature.

APPLICATIONS: Concept models, functional prototypes, low-wear toys, etc.

NOT SUITABLE FOR: Long term outdoor usage because of low temperature resistance (up to 60 °C).

POST-PROCESSING: Wet sanding. Without water you'll quickly start heating the plastic by friction, it will melt locally and make it hard to keep sanding.

IDENTIFICATION:

Trade name	Prusament PLA
Chemical name	Polylactic Acid
Usage	FDM 3D printing
Manufacturer	Prusa Polymers, Prague, Czech Republic

RECOMMENDED PRINT SETTINGS:

Nozzle Temperature [°C]	210 ± 10
Heatbed Temperature [°C]	40-60
Print Speed [mm/s]	up to 200

TYPICAL MATERIAL PROPERTIES:

Physical Properties	Typical Value	Method
Peak Melt Temperature [°C]	145-160	ISO 11357
Glass Transition Temperature [°C]	55-60	ISO 11357
MFR [g/10min](1)	10.4	ISO 1133
MVR [cm ³ /10min](1)	9.4	ISO 1133
Specific Gravity [g/cm ³]	1.24	ISO 1183
Moisture Absorption 24 hours [%](2)	0.3	Prusa Polymers
Moisture Absorption 7 days [%](2)	0.3	Prusa Polymers
Moisture Absorption 4 weeks [%](2)	0.3	Prusa Polymers
Heat Deflection Temperature (0,45 MPa) [°C]	55	ISO 75
Tensile Yield Strength Filament [MPa]	57.4 ± 0.4	ISO 527-1

MECHANICAL PROPERTIES OF PRINTED TESTING SPECIMENS(3):

Property / print direction	Horizontal	Vertical X, Y-Axis	Vertical Z-Axis	Method
Tensile Modulus [GPa]	2,2 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,3 ± 0,1	ISO 527-1
Tensile Yield Strength [MPa]	50,8 ± 2,4	59,3 ± 1,9	37,6 ± 4,0	ISO 527-1
Elongation at Yield Point [%]	2,9 ± 0,3	3,2 ± 0,1	1,9 ± 0,3	ISO 527-1
Impact Strength Charpy(4) [kJ/m ²]	12,7 ± 0,7	13,7 ± 0,7	5,0 ± 1,4	ISO 179-1

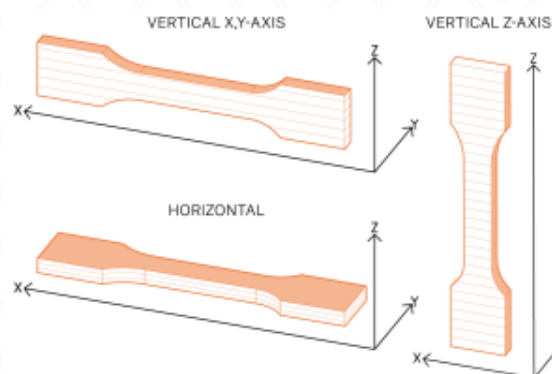
(1) 2,16 kg; 210 °C |

(2) 28 °C; humidity 37 %

(3) Original Prusa i3 MK3 3D printer was used to print testing specimens. Slic3r Prusa Edition 1.40.0 was used to create G-codes with following settings: Prusa PLA Filament; Print settings 0,20mm FAST (layers 0,2mm); solid layers Top: 0 Bottom: 0; Infill 100% Rectilinear, infill print speed 200mm/s; extruder temperature 215°C all layers; bed temperature 60°C all layers; other parameters set to default | (4) Charpy Unnotched, edgewise direction of blow according to ISO 179-1

Disclaimer

The results presented in this data sheet are just for your information and comparison. Values are significantly dependent on print settings, operators experiences and surrounding conditions. Everyone have to consider suitability and possible consequences of printed parts usage. Prusa Polymers can not carry any responsibility for injures or any loss caused by using of Prusa Polymers material.



PRÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST PRE FILLAMENTUM ABS FILAMENT

Datasheet



ABS Extrafill

Description:

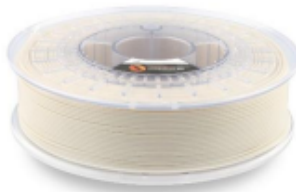
Fillamentum ABS Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

ABS filament is suitable for the production of the first samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday use.

This material can be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances. The use of the material in the food or medical industry is not recommended.

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of +/- 0,05 mm, which is strictly controlled throughout the production.

Printing filaments marked under the trademark Fillamentum are produced in a wide variety of colours in accordance with the colour charts RAL and Pantone, and also in own unique colour ranges.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
---------------------	---------------	-------------	----------------

Material density	1,04 g/cm ³	ISO 1183	23 °C
Melt volume index	29 cm ³ /10 min	ISO 1133	220 °C, 10 kg
Diameter tolerance	+ 0,05 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
-----------------------	---------------	-------------	----------------

Tensile strength	39 MPa	ISO 527	at yield, 50 mm/min
	32 MPa	ISO 527	at break, 50 mm/min
Elongation at break	20 %	ISO 527	50 mm/min
Flexural strength	60 MPa	ISO 178	2 mm/min
Flexural modulus	1900 MPa	ISO 178	2 mm/min
Izod impact strength	24 kJ/m ²	ISO 180-1A	23 °C, notched
	10 kJ/m ²	ISO 180-1A	-30 °C, notched
Charpy impact strength	25 kJ/m ²	ISO 179	23 °C, notched
	11 kJ/m ²	ISO 179	-30 °C, notched

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
--------------------	---------------	-------------	----------------

Heat deflection temperature	81 °C	ISO 75-A	1,8 MPa
Vicat softening temperature	103 °C	ISO 306	50 °C/h, 1 kg
	96 °C	ISO 306	50 °C/h, 5 kg
Coefficient of linear thermal expansion	9,0 × 10 ⁻⁵	ISO 11359	

Printing properties	Recommended	Notes
---------------------	-------------	-------

Print temperature	220-240 °C	Recommended settings!
Hot pad	80-105 °C	It may differ according to the printer and the object. Try your own settings before printing.
Adhesive	30lac, glue stick	

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.
nam. Miru 1217, 768 24 Hulín
Czech Republic

(+420) 720 060 947
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com