

Návrh drtiče pro výtisky z 3D tiskárny

Vladimír Ručka



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Vladimír Ručka
Osobní číslo:	T22296
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Návrh drtiče pro výtisky z 3D tiskárny

Zásady pro vypracování

- 1) Vypracovat literární studii na dané téma
- 2) Navrhnout drtič
- 3) Provést pevnostní a kapacitní výpočty
- 4) Vyhotovit výkresovou dokumentaci drtiče

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

Seznam doporučené literatury:

MAŇAS, Miroslav; STANĚK, Michal a MAŇAS, David. Výrobní stroje a zařízení I. 2007. ISBN 9788073185961.

DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2011. ISBN 9788070807880

GEBHARDT, Andreas; KESSLER, Julia a THURN, Laura. 3D printing: understanding additive manufacturing. 2019. ISBN 9781569907023.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vojtěch Šenkeřík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

L.S.

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

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- 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 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, považují 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(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na návrh drtiče, který umožní zpracování polymerního odpadu, především plastových výtisků vytvořených pomocí technologie 3D tisku.

V teoretické části bylo popsáno základní rozdělení polymerních materiálů, způsoby nakládání s polymerními odpady, nejčastěji používané typy drtičů a jejich způsob fungování, princip technologie 3D tisku a popis základních součástí drtiče.

V praktické části byl představen návrh drtiče spolu s výpočty potřebnými pro jeho fungování. Dále byla provedena volba vhodných pohonných komponent, které jsou nezbytné pro jeho efektivní provoz.

Klíčová slova: drtič, 3D tisk, polymerní odpad

ABSTRACT

The bachelor's thesis focuses on the design of a crusher that enables the processing of polymer waste, primarily plastic prints created using 3D printing technology.

The theoretical part describes the basic classification of polymer materials, methods of handling polymer waste, the most commonly used types of crushers and their modes of operation, the principle of 3D printing technology, and the description of the basic components of the crusher.

In the practical part, the crusher design was presented along with the calculations necessary for its operation. Furthermore, the selection of suitable drive components, which are necessary for its effective operation, was carried out.

Keywords: crusher, 3D printing, polymer waste

Touto cestou bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podporu během psaní této bakalářské práce. Zejména děkuji vedoucímu mé práce, panu Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi, Ph.D. za jeho trpělivé vedení, cenné rady a čas, který mi věnoval při jejím zpracování. Upřímné poděkování patří také mé rodině, snoubence a přátelům za jejich trpělivost, podporu a povzbuzení v průběhu celého procesu.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 POLYMERY.....	13
1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	13
1.1.1 Elastomery.....	13
1.1.2 Plasty	13
1.2 ROZDĚLENÍ PODLE NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURY	14
1.2.1 Amorfní	14
1.2.2 Semikrystalické	14
1.3 POLYMERNÍ ODPADY	14
1.4 RECYKLACE POLYMERŮ	15
2 DRTIČ	17
2.1 ČELIŠTOVÝ DRTIČ	17
2.2 KRUHOVÝ DRTIČ	18
2.3 KUŽELOVÝ DRTIČ.....	18
2.4 NÁRAZOVÝ DRTIČ	19
2.4.1 Nárazový drtič s vertikální hřídelí.....	20
2.4.2 Nárazový drtič s horizontální hřídelí.....	20
2.5 HRÍDELOVÝ DRTIČ.....	21
2.5.1 Jednohřídelový drtič.....	21
2.5.2 Dvouhřídelový drtič	22
2.5.3 Čtyřhřídelový drtič	23
2.6 RHODAX DRTIČ	23
3 3D TISK.....	24
3.1 VÝVOJ 3D TISKU	24
3.2 3D TISK FFF.....	25
3.2.1 Kartézská tiskárna	26
3.2.2 Delta tiskárna	26
3.2.3 Polar tiskárna.....	27
3.2.4 Recyklace FFF	27
3.3 3D TISK SLA.....	28
4 POPIS ZAŘÍZENÍ A SOUČÁSTÍ DRTIČE.....	29
4.1 ELEKTROMOTOR.....	29
4.1.1 Asynchronní motor.....	29
4.2 ŠNEKOVÁ PŘEVODOVKA.....	30
4.3 OZUBENÉ KOLO	30

4.4	HŘÍDEL	31
4.5	LOŽISKO	32
4.5.1	Valivé ložisko	32
4.6	PRUŽNÁ SPOJKA.....	32
II	PRAKTICKÁ ČÁST	33
5	STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	34
6	NÁVRH SOUČÁSTÍ DRTIČE.....	35
6.1	HŘÍDEL	35
6.1.1	Tolerance	36
6.1.2	Ohybový moment	37
6.1.3	Redukované napětí	38
6.2	OZUBENÉ KOLO	39
6.2.1	Osová vzdálenost.....	40
6.3	TĚSNÉ PERO.....	41
6.3.1	Tlak ve stykové ploše	42
6.3.2	Kontrola vlivu vrubu těsného pera	42
6.4	POJISTNÝ KROUŽEK	43
6.5	NŮŽ	43
6.6	NÁSYPKA A VÍKO.....	44
7	SPOJENÍ DRTIČE A POHONU	46
8	VOLBA POHONNÝCH KOMPONENT DRTIČE	48
8.1	VOLBA MOTORU	48
8.1.1	Kontrola kapacity drtiče	50
8.2	HŘÍDEL	51
8.3	PRUŽNÁ SPOJKA.....	51
8.4	LOŽISKO	52
	ZÁVĚR.....	54
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	55
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
	SEZNAM PŘÍLOH.....	66

ÚVOD

V dnešní době jsou polymery řazeny mezi nejčastěji používané a nejrozšířenější materiály na světě. Neustále rostoucí množství polymerního odpadu je vnímáno jako závažný problém v oblasti životního prostředí. Recyklace a efektivní nakládání s polymery po ukončení jejich využití jsou považovány nejen za technický, ale i společenský požadavek.

S rozvojem technologií a jejich lepší dostupností se technologie 3D tisku stala běžnou součástí domácí výroby. V současnosti je tato technologie zpřístupněna nejen profesionálům, ale i široké veřejnosti, což vedlo k jejímu masovému rozšíření. Zároveň je však kladena otázka, jak má být naloženo s výrobky, které již neslouží svému účelu nebo nebyly vyrobeny správně. I když je pořízení 3D tiskárny a potřebného materiálu dostupné široké veřejnosti, zařízení pro následné zpracování polymerního odpadu v domácích nebo menších provozech dosud běžně zavedeno není. Výsledkem bývá, že vadné nebo nepotřebné výtisky jsou často ukládány do smíšeného odpadu, přestože by mohly být dále využity. Tato skutečnost podtrhuje potřebu jednoduchého a efektivního řešení, kterým by bylo umožněno zpracování polymerních zbytků přímo v místě jejich vzniku.

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh zařízení, kterým bude umožněno efektivní zpracování již nepotřebných polymerních výrobků, zejména těch, které byly vytvořeny pomocí technologie 3D tisku. Cílem práce je návrh drtiče, kterým budou tyto polymerní výrobky rozdrčeny, čímž bude usnadněna jejich přeprava a současně budou připraveny k dalšímu zpracování nebo recyklaci. Navrženým řešením má být přispěno k efektivnějšímu využívání polymerního odpadu v menších a středních provozech, a tím i k podpoře odpovědného přístupu k nakládání s polymery.

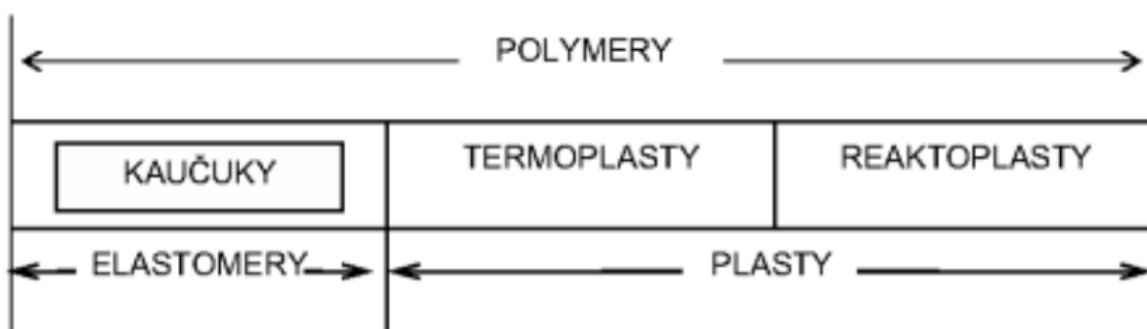
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Polymery jsou považovány za chemické látky s mimořádně širokým spektrem vlastností. V jejich rozsáhlých molekulách bývají obvykle obsaženy atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, a často také atomy chloru, dusíku či jiných prvků. V konečné podobě bývají polymery obvykle v tuhém stavu. Nicméně během určité fáze zpracování bývají polymery ve stavu téměř kapalném, a tím je umožněno za zvýšené teploty a tlaku tvarování materiálu do požadované podoby. [1]

1.1 Rozdělení polymerů

Na obrázku je zobrazeno základní rozdělení polymerů, které je ukázáno z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty.



Obr. 1 Grafické rozdělení polymerů

(zdroj: [1])

1.1.1 Elastomery

Elastomer bývá označován za vysoce elastický polymer, který může být za běžných podmínek malou silou značně deformován bez porušení a tato deformace je většinou vratná. Za nejpočetnější podmnnožinou elastomerů jsou označovány kaučuky, z kterých bývá vyráběna pryž (guma).

1.1.2 Plasty

Pod názvem plasty jsou označovány polymery, které jsou za běžných podmínek považovány za tvrdé a často i křehké. Za zvýšené teploty bývají polymery brány za plastické a tvarovatelné. Pokud bývá změna z plastického do tuhého stavu vratná (opakovatelná), mohou být označeny za termoplasty. Mezi nejznámější představitele termoplastů jsou zařazovány polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC),

polyamid (PA). V případě, kdy je změna nevratná (neopakovatelná, trvalá), protože je způsobena chemickými reakcemi, jsou tyto materiály nazývány reaktoplasty. Mezi nejznámější představitele reaktoplastů jsou zařazovány fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty. [1] [2]

1.2 Rozdělení podle nadmolekulární struktury

1.2.1 Amorfní

Molekulám je zde přisuzována nahodilá pozice, makromolekulární řetězce jsou nepravidelně prostorově uspořádány. Mezi její charakteristiky je řazena: vysoká tvrdost, křehkost, vysoká pevnost, transparentnost a průhlednost. Součinitel teplotní roztažnosti je uváděn jako menší než u semikrystalických polymerů. Použitelnost amorfních polymerů je dána do teploty zesklňování T_g . Mezi představitele amorfních polymerů jsou zařazovány polystyren (PS), polymethylmethakrylát (PMMA), polykarbonát (PC). [2]

1.2.2 Semikrystalické

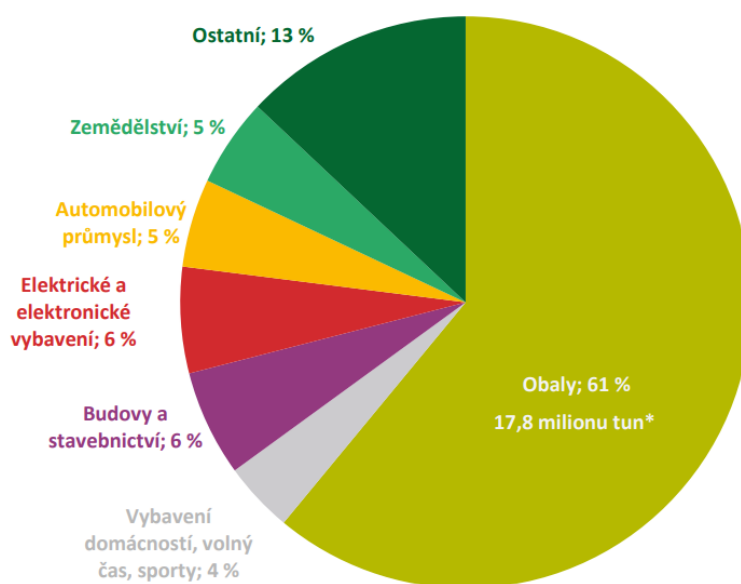
Vyazuje se uspořádání, velká část makromolekulárních řetězců je pravidelně a těsně uspořádaná. Důležitý je stupeň krystalinity (pohybuje se od 40 do 90%), který je vyjadřován jako relativní podíl uspořádaných oblastí, uložených mezi oblastmi amorfními. Mezi její charakteristiky patří, že je mléčně zakalená, houževnatost materiálu, pevnost a modul pružnosti je zvyšován se stupněm krystalinity. Použitelnost semikrystalických polymerů je dána do teploty tání T_m . Mezi představitele semikrystalických polymerů jsou zařazovány polyethylen (PE), polypropylen (PP), polyamid (PA), polytetrafluorethylen (PTFE), polyoxymethylen (POM). [2]

1.3 Polymerní odpady

Technický rozvoj lidské společnosti byl v minulém století ovlivněn zásadním růstem výroby polymerů. Největšího uplatnění bylo dosaženo u polymerů: polyethylen (32%), polypropylen (20%), polyvinylchloridu (17%), homopolymérů a kopolymérů styrenu (12%), polyurethanů (6%) a polyethyltereftalátu (5%). Díky svým vlastnostem a využití se polymery staly neodmyslitelnou součástí moderního života. S plynule stoupající spotřebou bylo již v sedmdesátých letech 20. století stále zřetelněji ukazováno, že odolnost polymerů k vnějšímu prostředí, ceněná při jejich aplikaci, se zejména u výrobků s krátkodobou životností, stává nevýhodou ve chvíli, kdy výrobek doslouží a stane se

odpadem. Většina polymerního odpadu v České republice je ukládána na skládkách, kde může být uchovávána po desetiletí bez podstatných změn. Pro každou technicky vyspělou zemi je nezbytné, aby bylo předcházeno vzniku dalších negativních důsledků ekonomického vývoje, a naopak aby bylo dbáno o ekologický rozvoj. Do této oblasti je nesporně zahrnuta také problematika nakládání s polymerními odpady.

Existuje několik druhů odpadů polymerních materiálů, mezi které zařazujeme: technologický, průmyslový a uživatelský odpad. U technologického odpadu je známé složení, je odvozen z určité technologické operace a obsahuje pouze jeden polymerní materiál. U průmyslového odpadu je známé složení, je odvozen z více technologických operací a obsahuje jeden nebo více polymerních materiálů. U odpadu uživatelského jde o výrobky z polymerů, které byly použity, dosloužily a byly zařazeny mezi odpad. Polymerní odpady mohou být, podle možnosti jejich zpracování, zhodnoceny, nebo odstraněny. [1]



Obr. 2 Vyprodukovaný polymerní odpad v EU podle odvětví v roce 2018

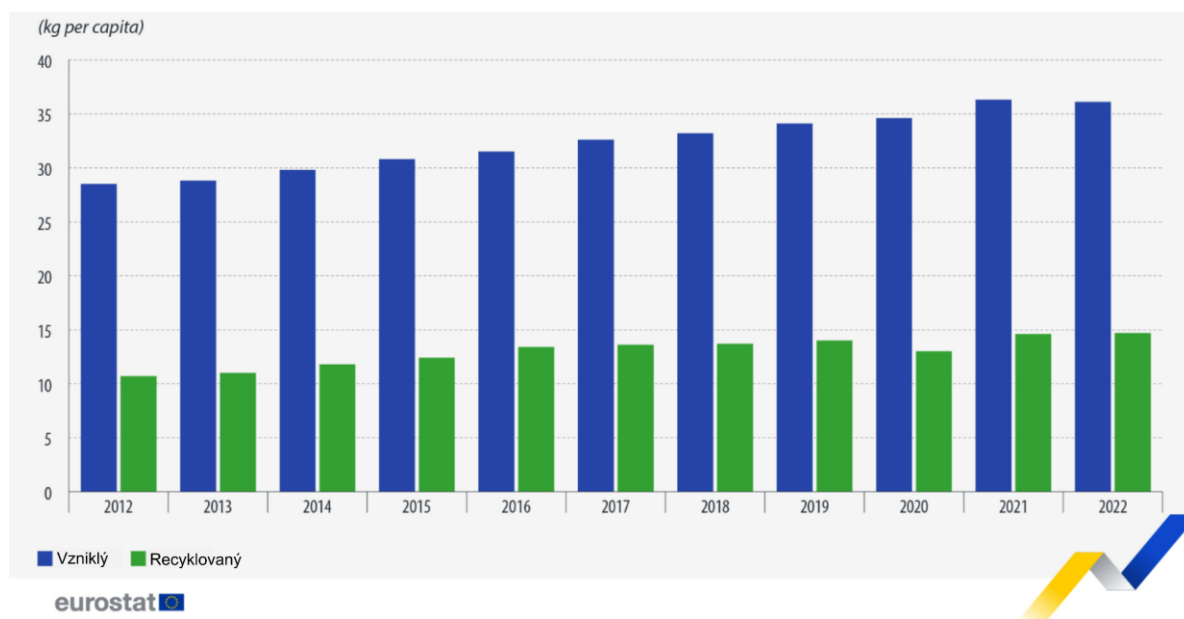
(zdroj: [3])

1.4 Recyklace polymerů

Nejpříjemnější formou nakládání s odpady z ekologického hlediska, je jejich recyklace. Recyklování je proces, při němž jsou použité výrobky sbírány a tříděny, a materiál z nich získaný se vrací k užívání. Recyklace je dnes rozlišována z několika hledisek: primární recyklace, sekundární recyklace, fyzikální recyklace, chemická recyklace. Při

primární recyklaci je z polymerního odpadu získáván materiál nebo výrobek, který vykazuje stejné nebo podobné vlastnosti jako původní materiál. Při sekundární recyklaci je z polymerního odpadu získáván materiál nebo výrobek, jehož vlastnosti se liší od vlastností původního materiálu nebo výrobku. U fyzikální recyklace je z odpadu získáván nový materiál nebo složky nového materiálu, aniž by probíhaly chemické reakce. Chemická recyklace je proces, při němž je druhově tříděný polymerní odpad chemicky rozkládán na nízkomolekulární sloučeniny, často i monomery, z nichž je následně vyráběn nový materiál pomocí chemických procesů.

Odpad je možné zhodnotit surovinově i energeticky. Při surovinovém zhodnocení je odpad přeměňován na základní suroviny chemického průmyslu nebo paliva, a to většinou tepelným rozkladem, hydrolytickými nebo jinými chemickými procesy. Při energetickém zhodnocení je využívána energetická hodnota odpadu spalováním, například pro výrobu tepla a elektřiny. [1]



Obr. 3 Odpad z plastových obalů produkovaný a recyklovaný v EU (2012-2022)

(zdroj: [4])

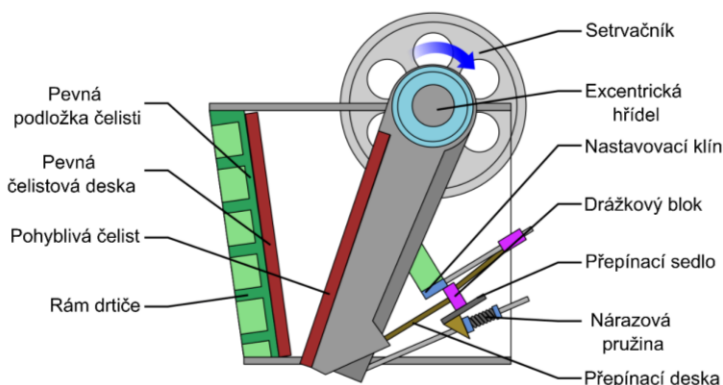
2 DRTIČ

Drtič je stroj, kterým je použitý materiál redukován na menší části, aby byl připraven k přepravě a dalšímu zpracování. [5]

Drtiče mohou být rozděleny na primární a sekundární. Primární drtiče jsou definovány jako stroje, kterými je surový materiál drcen na velikost vhodnou pro přepravu a pro následné zpracování v sekundárních drtičích. Mezi ně je zařazován čelistový drtič a kruhový drtič. Sekundární drtiče se používají k dalšímu drcení materiálu, který již byl zpracován primárními drtiči. Jsou označovány za mnohem lehčí než těžké primární stroje. Účelem je, aby velikost částic byla zmenšena na požadovanou, která je vhodná pro následné zpracování. Mezi ně jsou zařazovány kuželový drtič, nárazový drtič, hřídelový drtič, drtič Rhodax. [6] [7]

2.1 Čelistový drtič

Poznávacím znamením čelistového drtiče jsou dvě desky, které jsou zavírány a otevírány, od čehož je odvozen název jeho „čelistový“. Čelisti jsou k sobě nastaveny v ostrém úhlu a jedna čelist je nastavena tak, že je zhoupnuta k druhé pevné části. Materiál, který je přiváděn do čelistí, je střídavě stlačen a uvolňován tím způsobem, aby padal hlouběji do drtící komory. Na závěr je rozdrcený materiál vypuštěn z vypouštěcího otvoru. Čelistové drtiče se rozlišují podle mechanismu chodu pohyblivé čelisti a podle toho se dělí se na Blakeův a Dodgeův typ. Rozdíl spočívá v tom, že u Blakeova drtiče je čelist otočná z vrchu, zatímco u Dodgeova drtiče je čelist otočná ze spodu. Dodgeův drtič své uplatnění nalezne spíše jen pro laboratorní použití, zatímco Blakeův drtič má široké využití a nachází se v mnoha variantách čelistových drtičů. [7]

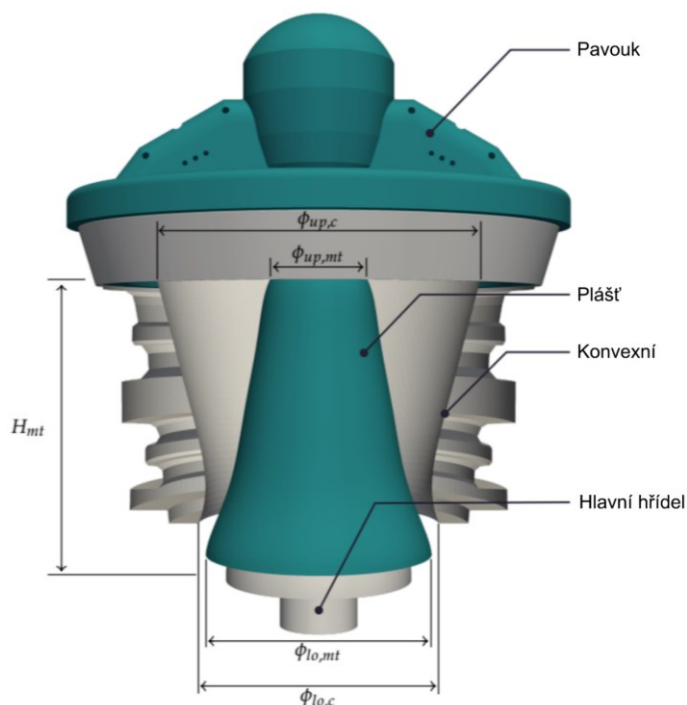


Obr. 4 Schéma čelistového drtiče

(zdroj: [8])

2.2 Kruhový drtič

Kruhový drtič je používán především v zařízeních na povrchové drcení. Oproti čelistovému drtiči je používán k drcení v průběhu celého cyklu, a má tedy mnohem větší kapacitu. Skládá se z dlouhého vřetene, na kterém je nesena hlava, tedy kuželový brusný prvek. Vřeteno je poháněno běžnou rychlostí mezi 85 - 150 ot/min a je zavěšeno na "pavoukovi". Během drcení jsou jednotlivé kusy materiálu stlačovány mezi rotující hlavu a horní segmenty pláště. Kruhové drtiče často nemají složité podávací mechanismy a jsou zásobovány přímo z nákladních vozidel. Kruhové drtiče jsou například v těžbě mědi celosvětově nejčastěji používané stroje. [7] [9]



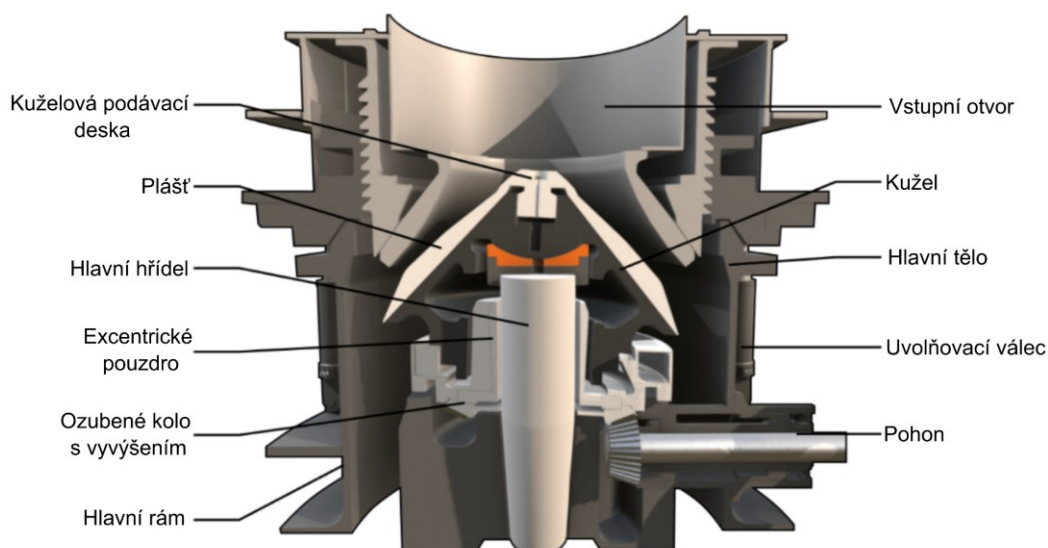
Obr. 5 Schéma kruhového drtiče

(zdroj: [9])

2.3 Kuželový drtič

Kuželový drtič je stroj, který je používán na drcení horninových materiálů, má vysokou účinnost a malou spotřebu energie. Kuželový drtič funguje tak, že pohyblivý kuželový povrch je opakovaně pohybován směrem k pevnému kuželovému povrchu a od něj. V momentě, kdy se pohybující kužel přiblíží k pevnému kuželu, částice jsou mezi těmito kužely rozdrceny ve vytlačovací dutině. Pokud se částice srazí s pohybujícím se kuželem, budou umístěny mezi pohyblivý a pevný kužel, a poté budou volně padat vlivem gravitace.

Po několika opakováních jsou větší částice rozbíjeny na menší, než projdou vypouštěcím ústím. Částice mohou být vypouštěny velice rychle, což výrazně zvyšuje produktivitu drtiče. [10]

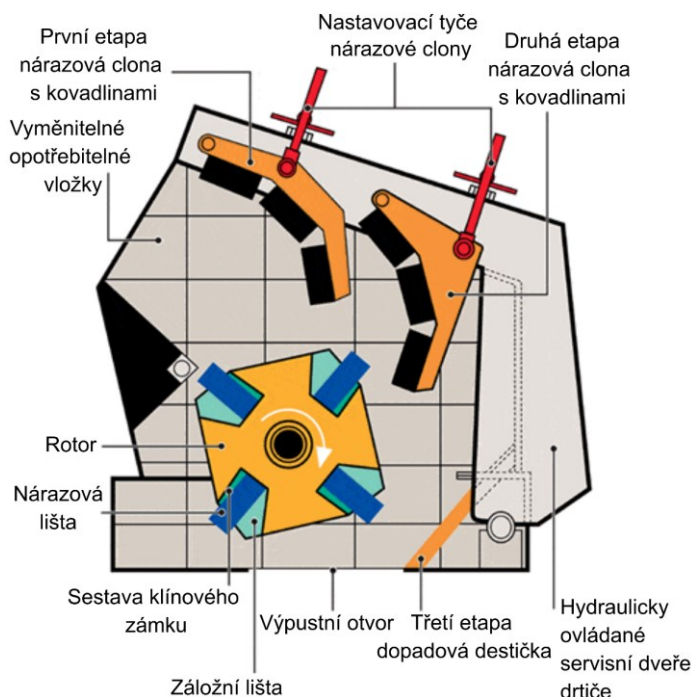


Obr. 6 Řez kuželového drtiče

(zdroj: [11])

2.4 Nárazový drtič

Nárazový drtič je využíván k aplikaci úderů drtících elementy místo stlačení. Úder je způsoben ve vysoké rychlosti volně padajícím kamení. Pohyblivé části při kontaktu s částicemi předávají část své kinetické energie, přičemž vnitřní napětí, vytvořené v částicích, bývá dostatečně velké na to, aby způsobilo jejich rozbití. Tyto síly se mohou zvyšovat tím, že částice narazí do desky. Například kuželový drtič často produkuje více protáhlých částic, z důvodu schopnosti projít komorou neporušeně a vysokému redukčnímu poměru. V nárazovém drtiči jsou všechny částice vystaveny nárazu a protáhlé částice jsou zlomeny. Materiál, který není rozbítý na požadovanou velikost, je rotorem přesunut opět k dalšímu nárazu. Tyto drtiče bývají velmi oblíbené v lomech. [7]



Obr. 7 Popis nárazového drtiče

(zdroj: [12])

2.4.1 Nárazový drtič s vertikální hřídelí

Nárazový drtič s vertikální hřídelí se stává stále více oblíbeným v různých průmyslových sektorech, jako je hutnictví, minerální drcení, zpracování stavebních agregátů aj. Výhodami tohoto drtiče jsou nízké provozní náklady, malý objem a dobrá distribuce velikosti drceného materiálu.

Tento drtič je složen z centrální rozdělovací desky, rotoru a drtící komory. Existují dva provozní režimy, které jsou u tohoto drtiče k dispozici: rock-to-steel a rock-to-rock. Všeobecně jsou částice zrychlovány rychle rotujícími rotory a poté rozbíjeny v drtící komoře. Existují některé parametry, které ovlivňují drtící účinek, jako je distribuce velikosti posuvu, rychlost posuvu, otáčky rotoru a fyzikální vlastnosti materiálů. [13] [14]

2.4.2 Nárazový drtič s horizontální hřídelí

U nárazového drtiče s horizontální hřídelí jsou částice materiálu rozdrceny vysokým nárazem kladiva nebo úderových tyčí. Drcený materiál bude ještě před opuštěním komory narážet na materiál, který se již v plášti nachází. To způsobuje, že výsledné částice budou jemně zrnité a budou mít jednotné velikosti. U tohoto drtiče je čas na zlomení částic zkrácen, ve srovnání s čelistovými nebo kuželovými drtiči. [15]

2.5 Hřídelový drtič

Hřídelový drtič je znám rovněž pod názvem válcový drtič. Válce byly pro drcení používány již od starověku, což bylo zapříčiněno tím, že se snadno vyráběly a instalovaly. Pro měkké až středně tvrdé částice jsou válcové drtiče i dnes preferovány, což je způsobeno především spolehlivou konstrukcí, nízkou výškou stroje a vynikajícím poměrem kapacity vůči hmotnosti stroje. Hřídelové drtiče mohou být rozděleny na jednohřídelové, dvouhřídelové a vícehřídelové. Hřídelové drtiče jsou složeny z drtících členů, které stlačují částice mezi válci, nebo mezi válci a pevnými hřebeny. [16] [17]



Obr. 8 Různé typy hřídelových drtičů:

- a) jednohřídelový drtič, který pracuje škrabáním,
- b) jednohřídelový drtič, který pracuje řezáním,
- c) dvouhřídelový drtič,
- d) čtyřhřídelový drtič.

(zdroj: [18])

2.5.1 Jednohřídelový drtič

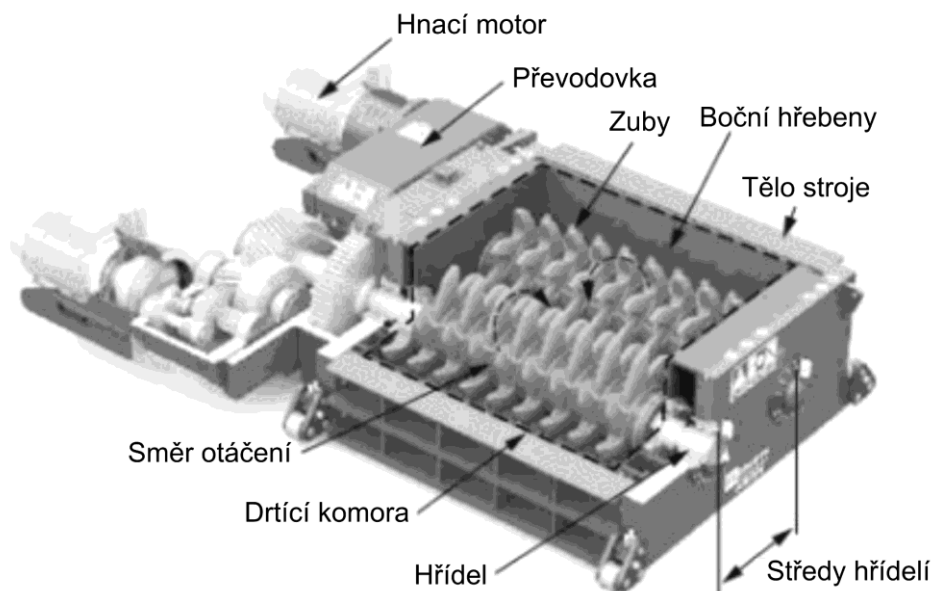
Jednohřídelové drtiče jsou používány pro zpracování materiálů s vysokou tloušťkou a odolností. Mezi hlavní výhody je zařazována dlouhá životnost a pevná, stabilní konstrukce.

Naopak nevýhodou může být sledována nižší pracovní rychlost a produkční kapacita. Materiál bývá obvykle drcen škrábáním nebo řezáním, přičemž pro jednohřídelové drtiče je škrábání více vhodné. [18]

2.5.2 Dvouhřídelový drtič

Dvouhřídelovým drtičům je přisuzována klíčová role v procesu recyklace. Jsou navrženy k efektivnímu zpracování široké škály tvrdých materiálů. Materiál je přemísťován do drticí komory skrz násypku. V drticí komoře jsou umístěny dvě hřídele, jejichž otáčení probíhá pomalu, avšak s vysokou silou. Při vstupu do drticí komory je materiál zachycen kotouči, které obsah drtí a lámou na menší kusy. Drcené kusy jsou regulovány sítovým mechanismem, který zajišťuje požadovanou velikost výstupního materiálu.

U dvouhřídelového drtiče je velmi důležité, aby měl vysoký točivý moment a nízkou rychlost. Pro dlouhé fungování a životnost je vyžadována pravidelná údržba, zahrnující rutinní kontroly, mazání, čištění a výměnu opotřebovaných dílů. Tento drtič je využíván v mnoha oblastech, mezi které patří recyklace plastů, kovů, textilu, zpracování dřeva a elektronického odpadu. [19]



Obr. 9 Klíčové komponenty dvouhřídelového drtiče

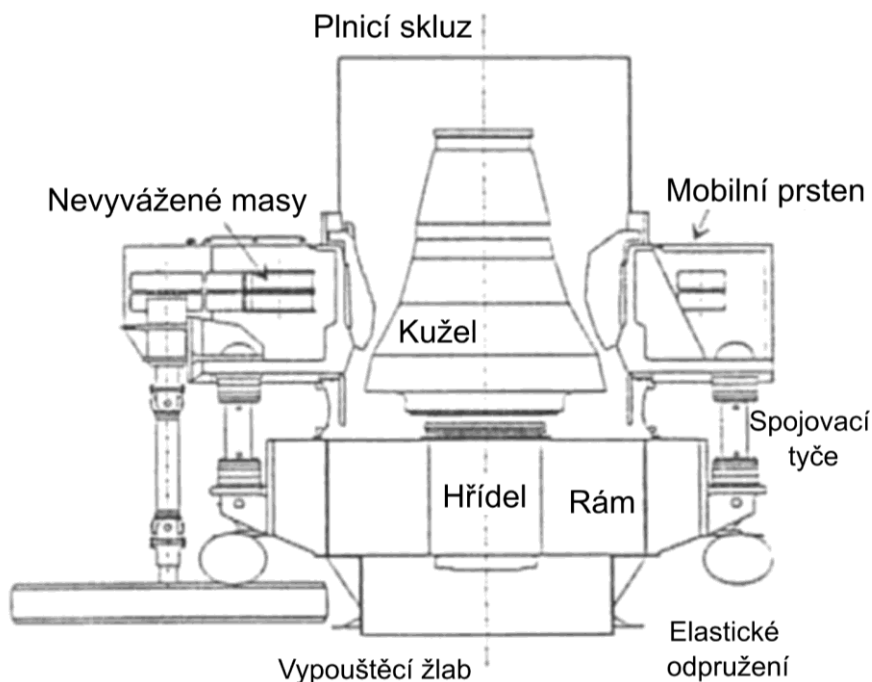
(zdroj: [17])

2.5.3 Čtyřhřídelový drtič

Čtyřhřídelové drtiče, stejně jako dvouhřídelové drtiče, jsou používány pro zpracování houževnatých plastových materiálů. Materiál může být i zde drcen škrábáním nebo řezáním, přičemž metoda řezání je pro čtyřhřídelové a dvouhřídelové drtiče vhodnější. Čtyřhřídelové drtiče bývají vybaveny pracovními hřídeli, na nichž jsou umístěny řezné nože. Horní dvě hřídele jsou používány jako podávací zařízení, zatímco dolní hřídele jsou využívány k řezání a drcení. Velikost drceného materiálu je ovlivňována rozměry drtící komory a tvarem násypky. [18]

2.6 Rhodax drtič

Rhodax drtič je speciální formou kuželového drtiče, kterou můžeme označovat jako inerciální kuželový drtič. Konstrukce se skládá z rámu podpírajícího pohyblivý prstenec (kroužek) a kužele a ze sady pevných spojů, které vytvářejí vazby mezi těmito částmi. Obsahuje centrální hřídel uchycenou na konstrukci. Drtící kužel je umístěn na této hřídeli, kde se může volně otáčet. Používá se zde posuvná manžeta (sliding sleeve), která slouží k nastavení vertikální polohy kužele a tím i mezery. Na drtiči Rhodax mohou být nastaveny tři parametry: mezera mezi kuzelem a prstencem, celkový statický moment nevyvážených hmotností a rychlost otáčení nevyvážených hmotností. [7]



Obr. 10 Schéma drtiče Rhodax a princip činnosti

(zdroj: [7])

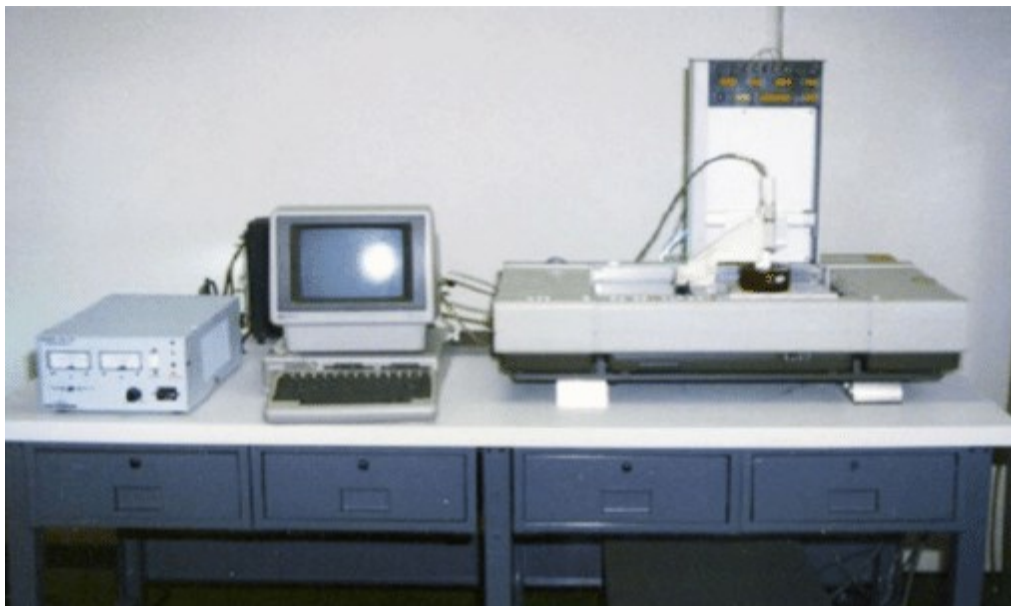
3 3D TISK

3D tisk je automatizovaný proces, při němž je z digitální předlohy 3D modelu vytvářen fyzický model. Spotřebitelské 3D tiskárny jsou rozdělovány do dvou hlavních typů: první jsou založeny na modelování depozice taveniny za použití vláken, což je technologie označovaná jako FFF (fused filament fabrication – výroba z tavného vlákna). Zatímco druhé jsou založeny na práci s pryskyřicí, metodou stereolitografie a jsou označovány zkratkou SLA (stereolithography – stereolitografie). FFF je považována za nejrozšířenější technologii. [20] [21]

3.1 Vývoj 3D tisku

Zpočátku byl 3D tisk označován jako Rapid Prototyping (rychlá výroba prototypů), s tímto označením se lze setkat dodnes. V době, kdy nebyla dostupnost 3D tiskáren rozšířena, byly používány výlučně k výrobě prototypů.

Technologie 3D tisku byla poprvé vyvinuta v roce 1984, kdy Charles W. Hull, pozdější zakladatel společnosti 3D Systems, získal patent na metodu známou jako stereolitografie. Tato technologie, běžně označovaná jako SLA, je využívána dodnes. [20]



Obr. 11 Stereolitografický přístroj od Charlese W. Hulla

(zdroj: [22])

S nástupem počítačů v druhé polovině 20. století a rozvojem pokročilého softwaru pro počítačově podporované navrhování (CAD) a výrobu (CAM), byly revolučním způsobem

změněny postupy navrhování, prototypování a výroby. Již ve 40. letech 20. století byl představen koncept číslicového řízení výroby, díky němuž mohly být následně zavedeny pokročilé výrobní technologie. V 80. letech 20. století byly navrženy již zmíněné první metody aditivní výroby, při kterých byly trojrozměrné objekty vytvářeny vrstvením materiálu. Vývojem otevřeného softwaru a snížením nákladů na tiskárny byla technologie rozšířena i mezi jednotlivce. Projekt RepRap, který vzešel z Univerzity v Bathu v roce 2005, byl impulzem, jenž nastartoval revoluci ve světě stolních tiskáren a přiblížil 3D tisk široké veřejnosti.

V současnosti je rozmach 3D tisku pozorován v široké škále odvětví. Mezi tradiční oblasti jeho využití patří letecký a automobilový průmysl, elektronika, robotika a konstrukce mechanických strojů. Vedle toho je připisována významná role 3D tisku také v medicíně, kde je umožněna výroba protetických pomůcek a orgánů, jako jsou ledviny, játra, kosti, cévy či zuby. Mezi perspektivní oblasti pro využití 3D tisku je řazen i módní sektor, zahrnující výrobu oblečení, šperků a obuvi.

Obecně je budoucnost 3D tisku spojována se širším využitím v domácnostech a snahou o další snižování výrobních nákladů. Technologie 3D tisku je považována za schopnou přinést významné změny v ekonomice i společnosti, podobně jako tomu bylo u průmyslové revoluce, kdy se zásadním způsobem výroba proměnila. [23]

3.2 3D tisk FFF

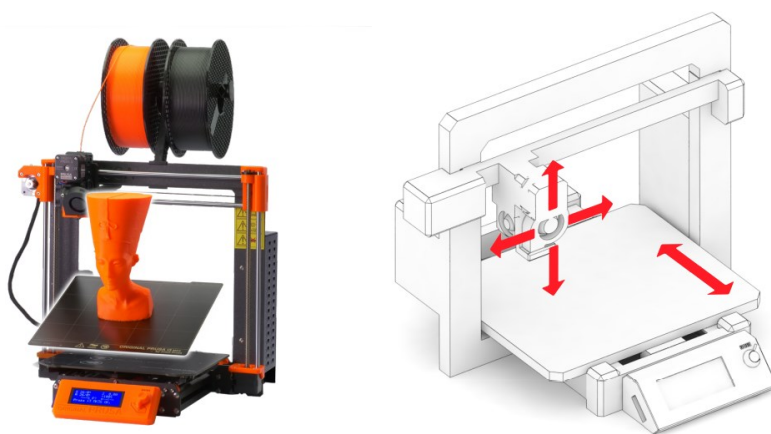
Technologie 3D tisku FFF je považována za nejrozšířenější a nejdostupnější. Bývá využívána pro tisk funkčních modelů a prototypů. Roztavený plast je používán jako její primární materiál, jenž je na sebe postupně nanášen vrstvu po vrstvě. Mezi základní komponenty FFF patří: vlákno, extrudér, tisková deska, ventilátor, horký konec, základna, tryska, kalibrační sonda, krokový motor, cívka s vláknem. Tiskovým materiálem bývá tisková struna (filament) obvykle s průměrem 1,75 mm. Dříve byl využíván i filament o průměru 3 mm, u něhož byla ovšem nižší přesnost při dávkování. [20] [21]

Při použití FFF je umožněno zpracovávání více druhů materiálu najednou, během tisku jednoho výrobku. Zajímavé využití zpracování více materiálů najednou bývá s profesionálními tiskárnami, kde je umožněn současný tisk stavebního a podpůrného materiálu. Za zmínku stojí také možnost použít různých odstínů barev najednou. [24]

Na základě způsobu pohybu v trojrozměrném prostoru jsou tiskárny rozděleny do dalších podkategorií, které reprezentuje kartézská tiskárna, delta tiskárna a polar tiskárna. [20]

3.2.1 Kartézská tiskárna

Tiskárna funguje na principu pohybu po třech lineárních osách, přičemž tisková hlava (extruder) je pohybována ve dvou osách (X, Z) a podložka je posouvána po jedné ose (Y). Tisková podložka je proto u většiny tiskáren konstruována v pravoúhlém tvaru. Příkladem této technologie je tiskárna Original Prusa i3 MK3S. [20]

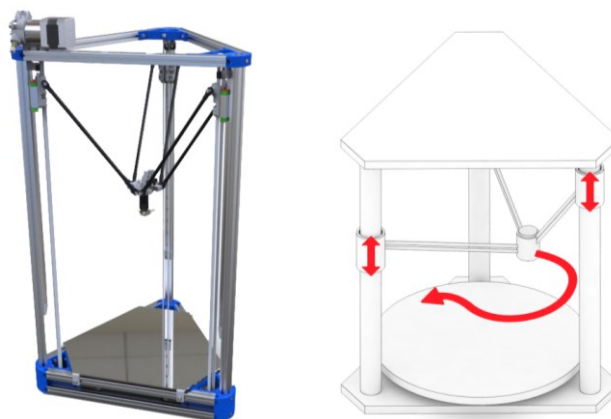


Obr. 12 Kartézská tiskárna – ukázka pohybu os X, Y a Z při 3D tisku

(zdroj: [20])

3.2.2 Delta tiskárna

U delta tiskárny je extruder zavěšen na třech ramenech, která jsou navzájem spojena v místě extruderu. Mezi výhody patří rychlé pohyby a velký tiskový prostor, zejména v ose Z. Při stavbě této tiskárny bývá vyžadována vysoká přesnost a následná kalibrace. Složitá geometrie je spojena s náročnými výpočty potřebnými pro pohyby krokových motorů jednotlivých ramen. [20]



Obr. 13 Delta tiskárna – tisk s pohybem tří ramen

(zdroj: [20])

3.2.3 Polar tiskárna

Jedná se o méně používaný systém, u něhož je polární pohyb tiskové hlavy realizován po dvou osách a na rotační podložce. Konstrukčně bývá tento systém velmi jednoduchý. Naopak předvedení a příprava modulu pro tisk bývá poměrně komplikovaná. [20]



Obr. 14 Ukázka polar tiskárny

(zdroj: [20])

3.2.4 Recyklace FFF

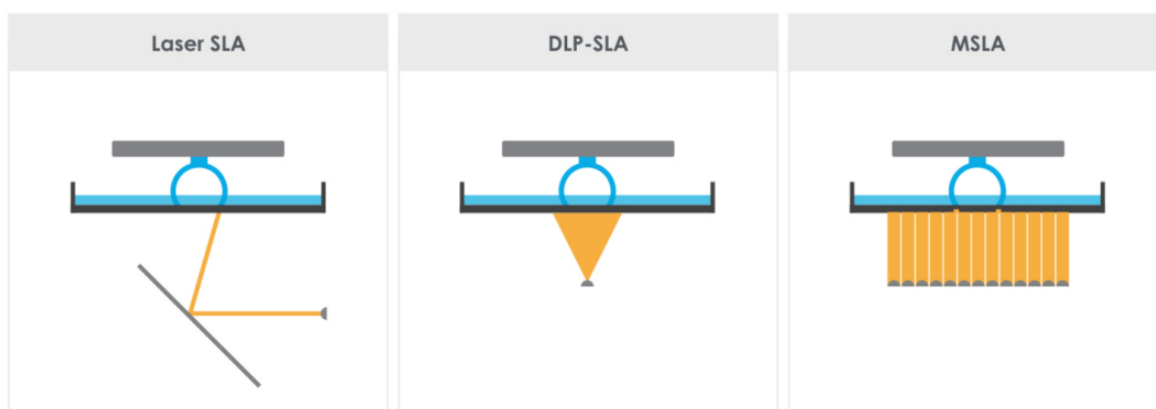
Podobně jako u jiných výrobních procesů dochází i při 3D tisku FFF k tomu, že část zpracovávaného materiálu končí jako odpad. Na druhou stranu je třeba si uvědomit, že 3D tisk umožňuje prodloužit životnost mnoha věcí, které by jinak skončily jako odpad již dříve, a tím zbytečně zatěžovaly životní prostředí, čímž by se zvýšila ekologická zátěž. [20]

Nejpoužívanějším materiálem bývá PLA (polylaktidová kyselina), který bývá považován za biologicky rozložitelný. Další používaný materiál je ABS (akrylonitril butadien styren), který je rovněž recyklovatelný, i když tento proces je složitější a vyžaduje více energie. Recyklace těchto materiálů může zahrnovat jejich roztavení a následné využití k výrobě nových tiskových vláken.

Recyklace vyžaduje značné množství zdrojů a je technicky náročná, z toho důvodu je klíčové zaměřit se na snižování odpadu při samotném 3D tisku. Toho lze dosáhnout například pečlivým plánováním tiskových úloh, optimalizací využití materiálu nebo použitím technik, jako je tisk v dutém režimu, který snižuje spotřebu surovin. Recyklace materiálů používaných při 3D tisku hraje klíčovou roli v udržitelnosti této technologie. Přestože je proces recyklace často složitý, představuje důležitý krok k ochraně životního prostředí. [25]

3.3 3D tisk SLA

Stereolitografie je metoda, při níž je tekutá pryskyřice vytvrzována pomocí UV záření. Do stereolitografie bývají zařazovány tři technologie procesů: laserová stereolitografie (laser SLA), stereolitografie digitálního zpracování světla (DLP) a stereolitografie s maskou (MSLA). Všechny zmíněné technologie fungují právě na principu ozařování tekuté pryskyřice UV zářením. Hlavní rozdíl mezi těmito technologiemi je dán použitým zdrojem UV záření. [26]



Obr. 15 Princip technologií laserové SLA, DLP a MSLA

(zdroj: [26])

4 POPIS ZAŘÍZENÍ A SOUČÁSTÍ DRTIČE

Mezi zařízení a součásti související s fungováním hřídelového drtiče bývají řazeny: elektromotor, hřídel, ozubené kolo, ložisko, šneková převodovka a pružná spojka.

4.1 Elektromotor

Elektromotor je elektrický stroj, který s nástupem elektrizace zasáhl do všech činností vyžadujících pohyb. Elektrická energie bývá přeměňována na mechanickou práci, přičemž účinnost se obvykle pohybuje mezi 70 % až 95 %. Elektromotory bývají rozdělovány podle několika kritérií – podle druhu napájecího napětí na stejnosměrné a střídavé, podle přítomnosti nebo absence komutátoru se dělí na komutátorové, střídavé s točivým nebo eliptickým polem a motory s elektronickou komutací a na mnohé další. Při zaměření na menší točivé stroje s výkonem přibližně jednoho kilowattu jsou elektromotory obvykle rozdělovány do tří kategorií: asynchronní, komutátorové a bezkomutátorové motory. [27]



Obr. 16 Elektromotor od firmy KASTE

(zdroj: [30])

4.1.1 Asynchronní motor

Asynchronní motory patří k nejrozšířenějším motorům, jsou vyráběny v různých velikostech, od několika wattů až po desítky kilowattů. Na základě principu své činnosti bývají využívány všude tam, kde je dostupné střídavé napájecí napětí. Asynchronní motory jsou zpravidla napájeny třífázovým napětím, které je ve většině průmyslových aplikací běžně k dispozici. Při použití jednofázového napájení je nezbytné zahrnout buď rozběhový, nebo běhový kondenzátor. U tohoto typu motoru není vyžadována speciální údržba, jeho

životnost je limitována pouze opotřebením ložisek. Asynchronní motory byly v minulosti využívány především v zařízeních, kde nebyla potřeba regulace otáček, jelikož změna napětí nevedla k uspokojivým výsledkům. S poklesem cen elektroniky a rozvojem technologií frekvenčních měničů se však otevřely zcela nové možnosti. Frekvenční měniče umožňují efektivní a úsporné řízení otáček, a to od manuálního ovládání až po systémy integrované přímo v elektromotorech. [27]

4.2 Šneková převodovka

Šneková převodovka představuje mechanické zařízení určené k přenosu výkonu, které zajišťuje přenos rotačního pohybu a výkonu mezi dvěma osami, jež se vzájemně neprotínají a jsou vůči sobě kolmé. Skládá se ze dvou hlavních součástí: šneku a šnekového kola. Šnekové převodovky se oproti jiným typům převodovek vyznačují řadou výhod, mezi které patří vysoký převodový poměr, vysoká zatížitelnost, spolehlivost a tichý chod. Nevýhodou šnekových převodovek je však jejich relativně nízká účinnost. Šnek a šnekové kolo bývají umístěny v pouzdře nebo skříni převodovky, která zajišťuje jejich ochranu, stabilitu a správné zarovnání vnitřních částí. Konstrukce bývá navrhována tak, aby odolávala silám a namáhání vznikajícím během provozu. [28] [29]

4.3 Ozubené kolo

Ozubená kola představují strojní součásti, kterými je zajištěn převod točivého pohybu a přenos mechanické energie mezi hřídeli. Jsou využívány především pro převody s konstantním poměrem, ale mohou být součástí i složitějších převodových mechanismů. Ozubená kola se nejčastěji vyrábějí v modulech M1 až M8, ale mohou být i větší. Provedení ozubených kol bývá buď s nábojem, nebo bez náboje. Prokluzování může představovat významný problém při přenosu pohybu a síly mezi dvěma hřídeli, což může negativně ovlivnit přesnost a účinnost celého systému. Ozubená kola bývají navržena tak, aby se otáčela společně bez prokluzu. Kompaktní uspořádání, flexibilita, vysoká účinnost a spolehlivost bývají považovány za nejdůležitější vlastnosti, díky nimž jsou ozubená kola a převodové pohony často voleny v mnoha aplikacích. Při výrobě ozubených kol bývá využívána široká škála materiálů, zahrnující plasty, keramiku i ultravysokopevnostní oceli. [31] [32]

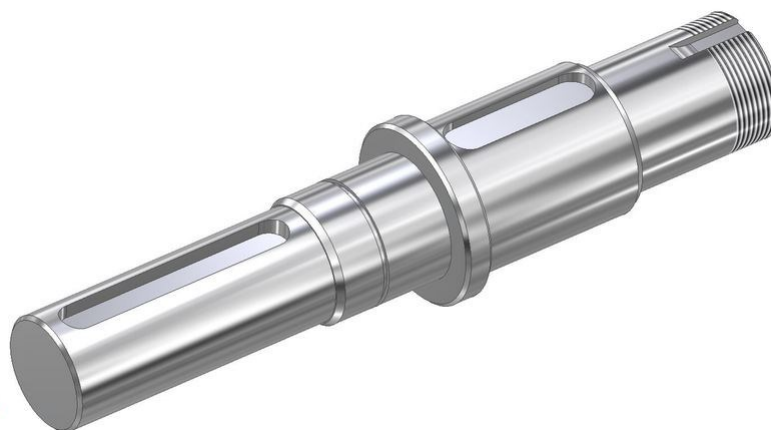


Obr. 17 Ukázka ozubeného kola modul 1

(zdroj: [31])

4.4 Hřídel

Hřídele jsou základní mechanické součásti zařízení, prostřednictvím kterých je zajištěna podpora rotačních prvků a přenos pohybu, krouticího nebo ohybového momentu. Kvalita a výkon hřídelí jsou zásadní pro spolehlivý a bezpečný provoz zařízení. Hřídele bývají rozdělovány podle tvaru do dvou základních typů: klikových a přímých. Další rozdělení je prováděno na základě zatížení, kterému jsou vystaveny, a to na trny, převodové hřídele a rotační hřídele. Rotační hřídele obvykle snášejí proměnlivé zatížení, jež zahrnuje kombinaci ohybového a krouticího momentu. Trny a převodové hřídele bývají namáhány ohybovým a točivým momentem. [33]



Obr. 18 Pohled na hřídel

(zdroj: [34])

4.5 Ložisko

Ložiska představují důležitou součástku umožňující otočné uložení čepů a hřídelí. Jsou konstruována tak, aby zajišťovala pohyb a zároveň přenášela vnější síly. Podle směru těchto sil bývají rozdělena na axiální a radiální, zatímco podle druhu tření se dělí na kluzná a valivá. [35]

4.5.1 Valivé ložisko

Valivá ložiska bývají používána k propojení částí mechanismu, přičemž umožňují jejich vzájemný relativní pohyb prostřednictvím umístění valivých těles mezi těmito částmi. Tato tělesa umožňují valivé tření během relativního pohybu. Ložiska se obvykle skládají ze dvou kroužků a valivých těles různých tvarů. Valivá tělesa jsou klecí pravidelně oddělena, což zabraňuje jejich vzájemnému styku a snižuje tření. [35]



Obr. 19 Valivé ložisko (NU 204 ECP/C3 SKF)

(zdroj: [36])

4.6 Pružná spojka

Pružné spojky jsou mechanická zařízení sloužící k přenosu kroutícího momentu mezi dvěma hřídeli. Jsou charakterizovány těmito vlastnostmi: tlumení rázů kroutícího momentu, změna kritických otáček převodového mechanismu, ochrana mechanismu před rezonančními torsními kmity vznikajícími v důsledku nerovnoměrnosti kroutícího momentu a nevyžadují souosost spojovaných hřídelů. Dále jsou schopny vyrovnávat vzájemné osové posuny a úhlové vychylky hřídelí. [35]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

V této bakalářské práci byly stanoveny následující cíle:

- vypracovat literární studii na dané téma,
- provést návrh drtiče,
- provést výpočty nezbytné k ověření návrhu,
- zhotovit výkresovou dokumentaci navržených součástí.

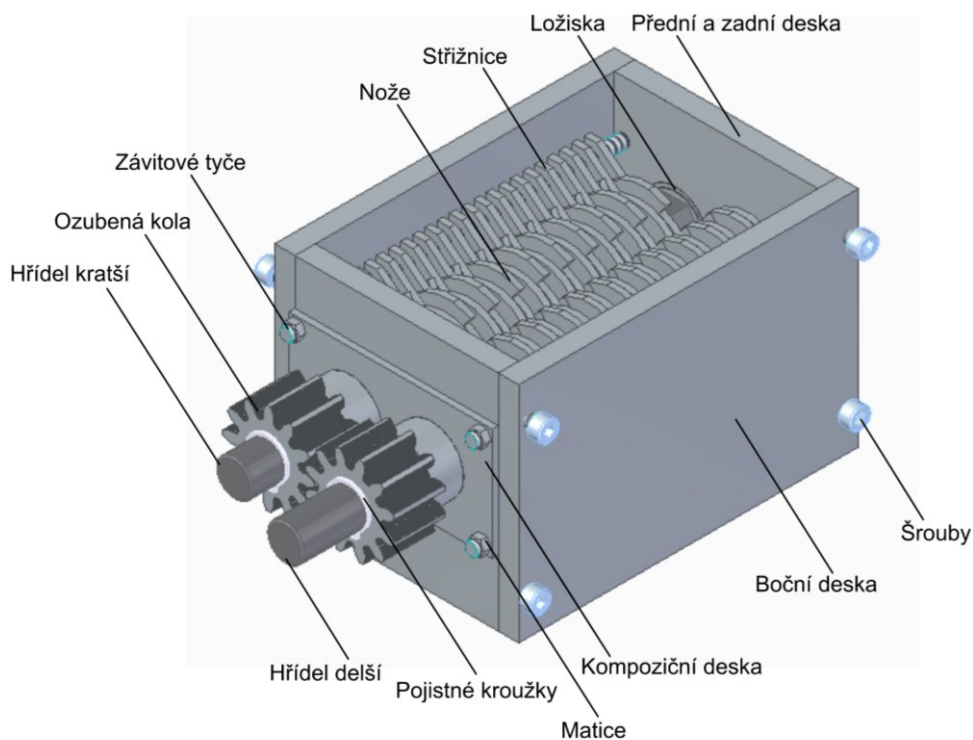
Literární studií je tvořena teoretická část práce, v níž jsou popsány různé typy drtičů, princip jejich fungování a oblasti jejich využití. Dále se tato část věnuje polymerním materiálům, jejich recyklaci, technologii 3D tisku a přehledu pohonných součástí.

V praktické části je navržen drtič určený pro malé a střední plastové díly, zejména vyrobené technologií 3D tisku. Součástí návrhu jsou pevnostní a kapacitní výpočty, kterými se ověřuje funkčnost zařízení. Na základě vypočtených parametrů jsou následně voleny vhodné komponenty, především motor, převodovka, pružná spojka, ložiska, ale i další součásti. V závěru práce byla vyhotovena výkresová dokumentace navržených součástí, která je součástí této práce.

6 NÁVRH SOUČÁSTÍ DRTIČE

Tato kapitola je zaměřena na jednotlivé součásti drtiče, které byly buď navrženy, nebo vybrány a upraveny pro požadované použití. U vybraných součástí je proveden výběr konkrétního řešení, u navržených pak kontrola a ověření pomocí pevnostních výpočtů, případně jejich kombinace. Většina součástí je tak doplněna o návrhový či kontrolní výpočet. U některých prvků, jako je například střížnice nebo přední a zadní deska nebyl, vzhledem k jejich funkci a jednoduchému zatížení, výpočet nutný, při jejich návrhu bylo potřeba pouze splnit rozměrové požadavky.

Přehled sestavy je uveden na obrázku 20. Pro lepší přehlednost zde není záměrně zobrazena násypka s víkem, tyto části jsou podrobněji rozpracovány v samostatné podkapitole s názvem *Násypka a víko*. Podrobnější rozpracování jednotlivých součástí je uvedeno v následujících podkapitolách.



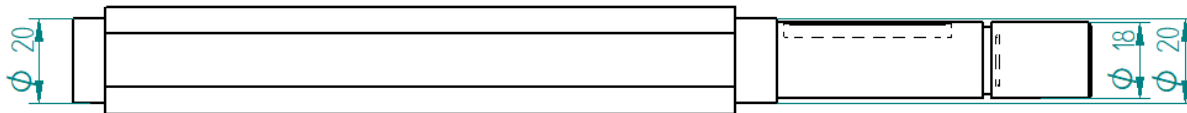
Obr. 20 Sestava drtiče

(zdroj: vlastní)

6.1 Hřídel

Hřídel je navržena ze šestihranné tyče o velikosti 22 mm z materiálu C45, který je běžně dostupný. Hřídel je rozdělena na několik částí, jak lze vidět na obrázku 21. Část se

šestihranným profilem je určena pro nože, část kruhové hřídele na začátku a na konci o průměru 20 mm je určena pro ložiska a část o průměru 18 mm je určena pro ozubené kolo a spojení s pružnou spojkou. Zároveň je na části hřídele o průměru 18 mm vytvořena drážka pro pero a pro pojistný kroužek.



Obr. 21 Hřídel drtiče

(zdroj: vlastní)

Aby bylo možné stanovit průměry hřídele, bylo nejprve nutné určit její minimální průměr na základě rovnice (1). K tomuto výpočtu bylo zapotřebí znát hodnotu krouticího momentu, jehož výpočet je uveden v rovnici (23) v kapitole 8.3 Pružná spojka. Dále bylo nezbytné určit mez únavy v krutu pro materiál C45, jejíž hodnota je uvedena ve strojnických tabulkách a činí $\tau_d = 70 \text{ MPa} = 70\,000\,000 \text{ Pa}$.

$$d_{\min} = \sqrt[3]{\frac{16 * M_k}{\pi * \tau_d}} = \sqrt[3]{\frac{16 * 73,75}{\pi * 70\,000\,000}} = \sqrt[3]{0,0000053685} = 0,01751 \text{ m} = 17,51 \text{ mm} \quad (1)$$

Kde: $d_{\min}$ – minimální průměr hřídele [mm], M_k – krouticí moment [Nm], τ_d – mez únavy v krutu [Pa]

Na základě tohoto výpočtu byla stanovena hodnota minimálního průměru hřídele $d_{\min} = 17,51 \text{ mm}$. Tato hodnota představuje mezní průměr, pod který by průměr hřídele neměl klesnout. Vzhledem k tomu, že nejmenší navržený průměr hřídele činí 18 mm, je tento požadavek splněn.

6.1.1 Tolerance

Dalším důležitým aspektem, který je nutné na hřídeli zkontrolovat, je tolerance jednotlivých součástí. Pro zajištění správného uložení byly zvoleny následující tolerance, jejichž hodnoty vycházejí ze strojnických tabulek.

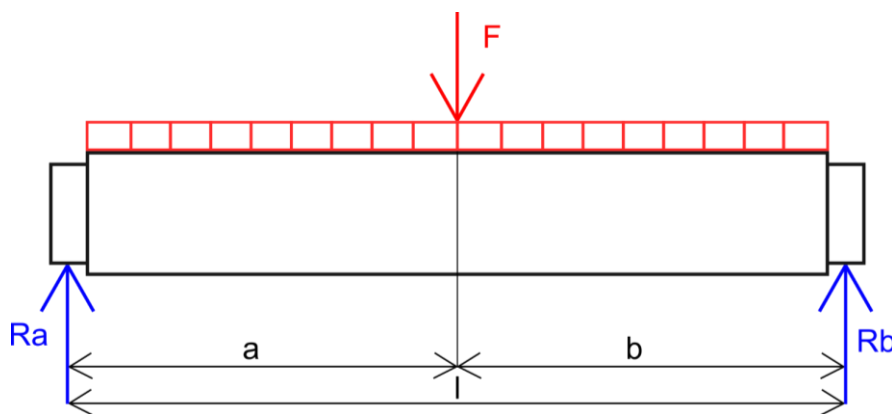
- Hřídel: tolerance h6 (horní mezní rozměr 18 mm, dolní mezní rozměr 17,987 mm)
- Spojka: tolerance H7 (horní mezní rozměr 18,021 mm, dolní mezní rozměr 18 mm)

- Ložisko: tolerance j6 (horní mezní rozměr 20,009 mm, dolní mezní rozměr 19,996 mm)

Na základě těchto hodnot lze potvrdit, že průměry hřídele 18 mm a 20 mm odpovídají požadovaným tolerancím a zajišťují správné uložení jednotlivých součástí.

6.1.2 Ohybový moment

Pro kontrolu hřídele byl v rovnici (1) proveden výpočet minimálního průměru na základě krouticího momentu. Pro jistotu je vhodné provést také výpočet a kontrolu ohybového momentu. Tento moment byl stanoven na základě spojitého zatížení, vyvolaného vlastní hmotností hřídele a hmotností pracovních nožů, které byly rovnoměrně rozmístěny po celé její délce. Celkové zatížení bylo nahrazeno výslednicí sil F , působící ve středu mezi dvěma ložisky, jak je znázorněno na obrázku 22.



Obr. 22 Schéma zatížení hřídele

(zdroj: vlastní)

Výpočet výslednice sil F je uveden v rovnici (2).

$$F = (z * m_{nůž} + m_{hřídel}) * g$$

$$= (22 * 0,034 + 0,669) * 9,81 = 13,9 \text{ N} \quad (2)$$

Kde: F – výslednice sil [N], z – počet nožů [-], $m_{nůž}$ – hmotnost jednoho nože [kg], $m_{hřídel}$ – hmotnost hřídele [kg], g – gravitační zrychlení [m/s^2]

Na základě vypočtené síly F byl proveden součet sil v ose y , jak je uvedeno níže:

$$R_a + R_b - F = 0 \quad (3)$$

Ze statické rovnováhy byly následně určeny reakce v ložiscích R_A a R_B :

$$R_a = R_b = \frac{F * b}{l} = \frac{13,9 * 78,5}{157} = 6,95 \text{ N} \quad (4)$$

Kde: F – výslednice sil [N], R_a – reakce v ložisku A [N], R_b – reakce v ložisku B [N], l – celková vzdálenost mezi ložisky [mm], b – vzdálenost ložiska od středu [mm]

Maximální ohybový moment byl poté určen podle vztahu:

$$M_{omax} = R_a * a = 6,95 * 78,5 = 545,58 \text{ Nmm} = 0,546 \text{ Nm} \quad (5)$$

Kde: M_{omax} – maximální ohybový moment [Nm], a – vzdálenost ložiska od středu [mm]

Vypočtený ohybový moment na hřídeli je poměrně malý, což je způsobeno nízkou hmotností a velikostí hřídele a pracovních nožů. Tato hodnota bude dále využita při kontrole redukovaného napětí v následující kapitole.

6.1.3 Redukované napětí

Vzhledem k tomu, že je hřídel během provozu současně namáhána krouticím i ohybovým momentem, byla pro ověření její mechanické únosnosti vypočtena hodnota redukovaného napětí a provedena jeho kontrola. Výpočet byl proveden v místě nejvyššího kombinovaného zatížení, tedy na stejném průřezu hřídele. Nejprve byla samostatně stanovena velikost ohybového a krouticího napětí, na jejichž základě bylo určeno redukované napětí, které bylo následně porovnáno s dovoleným napětím v tahu.

V prvním kroku bylo podle rovnice (6) určeno ohybové napětí.

$$\sigma_o = \frac{M_{omax}}{W_o} = \frac{546}{1\,108,7} = 0,492 \text{ Mpa} \quad (6)$$

Kde: σ_o – ohybové napětí [MPa], M_{omax} – maximální ohybový moment [Nmm], W_o – průřezový modul v ohybu [mm³]

Průřezový modul W_o byl stanoven podle vztahu:

$$W_o = \frac{5 * \sqrt{3}}{16} * a^3 = \frac{5 * \sqrt{3}}{16} * 12,7^3 = 1\,108,7 \text{ mm}^3 \quad (7)$$

Kde: a – délka strany šestihranu [mm]

Následně bylo vypočteno smykové napětí od krouticího momentu:

$$\tau_k = \frac{Mk}{Wk} = \frac{73\,750}{2\,129,6} = 34,63 \text{ Mpa} \quad (8)$$

Kde: τ_k – smykové napětí [MPa], M_k – krouticí moment [Nmm], W_k – polární modul průřezu [mm³]

Modul průřezu W_k byl určen vztahem:

$$W_k = 0,2 * d^3 = 0,2 * 22^3 = 2\,129,6\,mm^3 \quad (9)$$

Kde: d – šířka šestihranu [mm]

Redukované napětí bylo vypočteno podle rovnice (10) a následně bylo provedeno dosazení v rovnici (11).

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3\tau_k^2} \leq \sigma_{tDOV} \quad (10)$$

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3\tau_k^2} = \sqrt{0,492^2 + 3 * 34,63^2} = 59,98\,Mpa \quad (11)$$

Dovolené napětí v tahu se pohybuje v rozmezí 150–175 MPa. Redukované napětí je tedy nižší než dovolené, takže je podmínka splněna.

$$\sigma_{RED} \leq \sigma_{tDOV} \quad (12)$$

6.2 Ozubené kolo

Na základě rozměrů drtiče a nožů bylo nutné zvolit ozubené kolo s celkovou výškou v rozmezí 40–50 mm, které mělo dostatečnou výšku náboje pro zvětšení průměru díry na 18 mm, čímž byla zajištěna kompatibilita s požadovaným průměrem hřídele. Pro splnění těchto požadavků bylo vybráno čelní ozubené kolo M2,5 Z16 s nábojem od společnosti Arkov. Parametry tohoto ozubeného kola jsou uvedeny na obrázku 23.

Kód:	Kód výrobce:	Celková výška [mm]:
231702		45
Šířka bez náboje [mm]:	Šířka s nábojem [mm]:	Výška náboje [mm]:
25	40	32
Průměr díry [mm]:	Modul:	Materiál:
12	M2.5	ocel C45 UNI 7845

Obr. 23 Parametry ozubeného kola

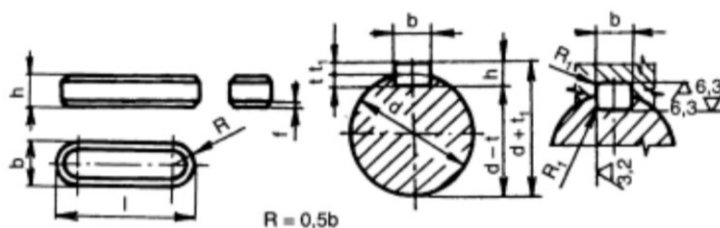
(zdroj: [37])

6.3 Těsné pero

Ozubené kolo je s hřídelí spojeno pomocí těsného pera, jehož rozměry je nutné správně určit. K jejich určení byly použity strojní tabulky, jak je uvedeno na obrázku 25. Vzhledem k tomu, že průměr hřídele se nachází v rozmezí 17 až 22 mm, platí pro něj rozměry vyznačené červeně.

PERA TĚSNÁ

Výběr z ČSN 02 2562
Účinnost od 1. 8. 1963



Označení těsného pera o šířce $b = 12$ mm, výšce $h = 10$ mm a délce $l = 80$ mm, s mezními úchytkami šířky e7:

PERO 12e7 $\times$ 10 $\times$ 80 ČSN 02 2562

Rozměry v mm

Průměr hřídele d	Rozměry				Hloubka drážky				Poloměr drážky R_1
	b	h	f	l	t	mezní úchytky	t_1	mezní úchytky	
6 až 8	2	2	0,25	8 až 20	1,1	+0,1 0,0	0,9		0,2
8 až 10	3	3		8 až 36	1,7		1,3		
10 až 12	4	4		10 až 45	2,4		1,6		
12 až 17	5	5	0,5	12 až 56	2,9		2,1	+0,2	0,4
17 až 22	6	6		16 až 70	3,5		2,5	+0,1	

Obr. 25 Strojnické tabulky volba pera

(zdroj: [38])

Na základě požadovaných rozměrů bylo zvoleno pero DIN 6885A 6x6x36 od společnosti Arkov, které je zobrazeno na obrázku 26. Pero má následující parametry: šířka 6 mm, výška 6 mm, délka 36 mm, tolerance h9 a je vyrobeno z oceli.



Obr. 26 Pero těsné DIN 6885A 6x6x36

(zdroj: [39])

6.3.1 Tlak ve stykové ploše

Pro ověření, zda nedojde k poškození pera a drážky vlivem zatížení, je nutné provést výpočet tlaku ve stykové ploše, jak je uvedeno v rovnici (16). Hodnota kroutícího momentu byla určena z rovnice (23), přičemž hodnoty t_1 a l byly převzaty z údajů o použitém peru. Průměr hřídele d je pro výpočet nutné upravit o velikost drážky t , jak ukazuje rovnice (15).

$$d_{\text{drážky}} = d - t = 18 - 3,5 = 14,5 \text{ mm} \quad (15)$$

Kde: $d_{\text{drážky}}$ – průměr hřídele po odečtení velikosti drážky [mm], d – průměr hřídele před odečtením drážky [mm], t – velikost drážky [mm]

Po této úpravě byl proveden výpočet tlaku ve stykové ploše:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{2 * M_k}{t_1 * l * d} = \frac{2 * 73\,750}{2,5 * 36 * 14,5} = 113,027 \text{ MPa} \quad (16)$$

Kde: F – zatěžující síla [N], S – kontaktní plocha mezi perem a drážkou [mm²], M_k – přenášený kroutící moment [Nmm], t_1 – hloubka drážky v náboji [mm], l – délka pera [mm], d – průměr hřídele [mm]

Dovolený tlak v oceli je $p_D = 120 \text{ MPa}$. Vypočtená hodnota $113,027 \text{ MPa}$ tento požadavek splňuje.

6.3.2 Kontrola vlivu vrubu těsného pera

Vzhledem k tomu, že v rovnici (15) byl vypočten průměr drážky $d_{\text{drážky}} = 14,5 \text{ mm}$, je vhodné provést kontrolu vlivu vrubu těsného pera. Tato kontrola bude provedena pomocí rovnice (17). Jednotlivé hodnoty byly určeny ze strojnických tabulek.

$$k = \frac{\tau_d * \kappa_\tau}{\beta_\tau * \tau} = \frac{200 * 0,98}{1,7 * 70} = 1,647 \quad (17)$$

Kde: τ_d – mez únavy v krutu [MPa], κ_τ – součinitel velikosti pro krut u legované oceli [-], β_τ – vrubový součinitel v krutu pro ocel [-], τ – smykové napětí v krutu [MPa]

Jelikož vypočtený bezpečnostní součinitel $k = 1,647$ je větší než 1, drážka pro pero vyhovuje a nezpůsobuje kritické oslabení hřídele.

6.4 Pojistný kroužek

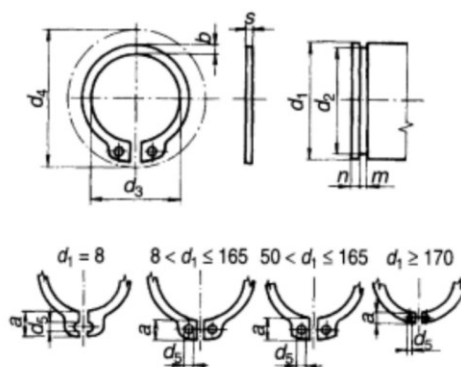
Ozubené kolo je na hřídeli zajištěno pomocí pojistného kroužku, jehož rozměry je nutné správně určit. K jejich určení byly použity strojní tabulky, jak je uvedeno na obrázku 27. Vzhledem k tomu, že průměr hřídele činí 18 mm, platí pro něj rozměry vyznačené červeně.

POJISTNÉ KROUŽKY PRO HŘÍDELE

Výběr z ČSN 02 2930
Účinnost od 1. 2. 2003

Nenapružený kroužek

Drážka v hřídeli



Označení pojistného kroužku pro hřídel o průměru $d_1 = 40$ mm

POJISTNÝ KROUŽEK 40 ČSN 02 2930

Rozměry v mm

d_1	s h11	a	b $\approx$	d_2		d_3		d_4 při roze- vření	d_5 min.	m		n
				jmenovitý	dovolená úchylka	jmenovitý	dovolená úchylka			min.	max.	
18	1,2	3,8	2,6	17,0	h11	16,5	+0,18 -0,36	26,8	1,7	1,3	2,5	1,50

Obr. 27 Strojnické tabulky volba pojistného kroužku

(zdroj: [38])

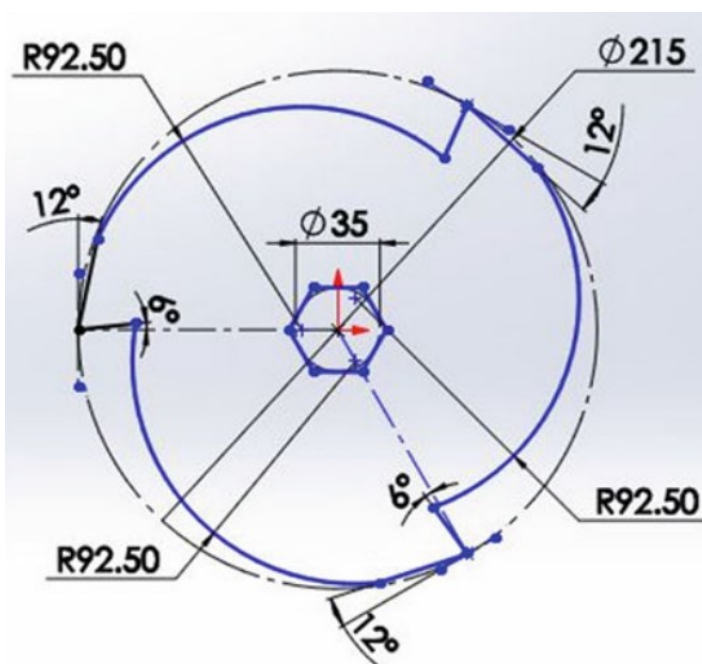
Na základě těchto požadavků byl zvolen pojistný kroužek DIN 471 o průměru 18 mm, vyrobený z oceli, od společnosti Arkov. U této součásti je však možné bez problémů využít i jiných dodavatelů.

6.5 Nůž

Při návrhu tvaru řezného nože byla inspirací studie s názvem Design of Shredder Machine for ELV Tyres (Návrh drtiče pneumatik z vyřazených vozidel), která se zabývala konstrukcí nože pro drtič pneumatik. Ve studii byla navržena upravená geometrie nože s úhlem čela 6° a úhlem hřbetu 12° . Každý nůž měl tři řezné hrany a byl natočen po 30° . Tento návrh byl ověřen metodou konečných prvků v programu ANSYS. Výsledky ukázaly,

že napětí podle teorie von Mises dosáhlo hodnoty 88,375 MPa a bezpečnostní součinitel byl stanoven na 2,83, což prokázalo dostatečnou pevnost a spolehlivost navrženého řešení.

Jednotlivé rozměry nože jsou zobrazeny na obrázku 28. V rámci tohoto návrhu byl použit totožný tvar nože, avšak s odlišnou velikostí šestihranu, čímž byly splněny požadavky na hřídel.



Obr. 28 Geometrie řezného nože

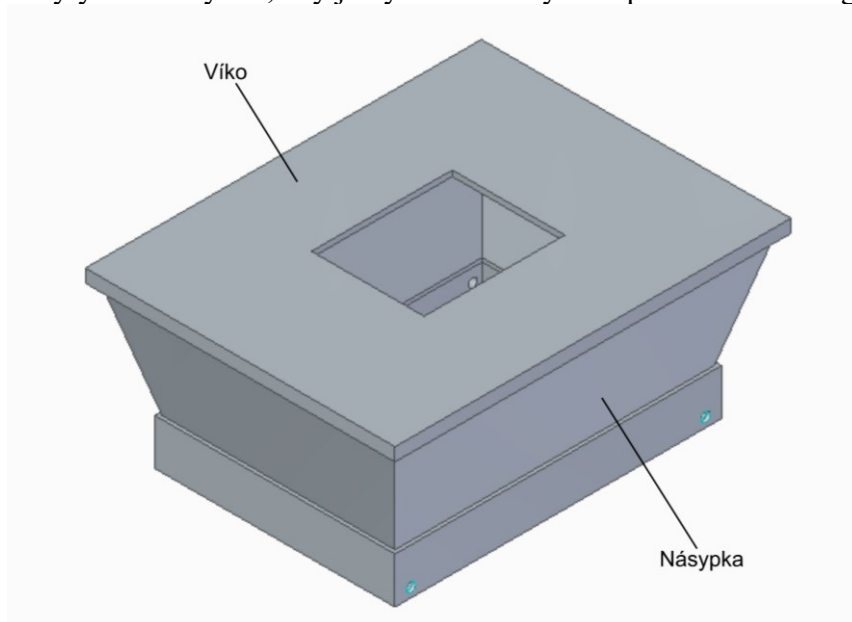
(zdroj: [40])

6.6 Násypka a víko

Součástí drtiče je také násypka, která je určena k bezpečnému vkládání polymerních výtisků do drticího prostoru. Její tvar zajišťuje, aby byl materiál veden přímo k nožům a nedocházelo k jeho zpětnému vystřelování. Násypka byla navržena s mírným sklonem a dostatečně širokým vstupním otvorem, aby bylo umožněno pohodlné dávkování i větších dílů. K drtiči je připevněna pomocí šroubů umístěných po jejích bocích.

Dále je drtič vybaven víkem, kterým je uzavřena horní část sestavy a zvýšena celková bezpečnost zařízení. Víko tím zabraňuje kontaktu uživatele s rotujícími částmi během provozu a rovněž je omezeno zpětné vystřelování materiálu, ke kterému by mohlo dojít například při nárazu nože na tvrdší část výtisku. Víko je z větší části uzavřené, přičemž ve střední části je ponechán otvor pro vkládání výtisků do násypky, jak je patrné z obrázku 29. V případě potřeby lze víko snadno odejmout, například při drcení objemnějších kusů.

Obě součásti byly navrženy tak, aby je bylo možné vyrobit pomocí technologie 3D tisku.



Obr. 29 Model násypky a víka

(zdroj: vlastní)

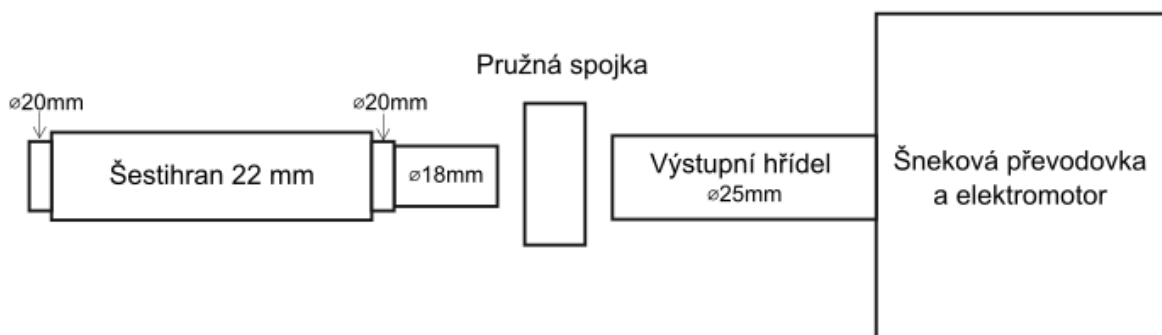
7 SPOJENÍ DRTIČE A POHONU

Po dokončení konstrukčního návrhu drtiče bylo nutné stanovit způsob, jakým bude drtič poháněn a mechanicky propojen s pohonnou jednotkou. Hlavním cílem této části návrhu bylo nalezení funkčního a spolehlivého řešení, které by zajistilo řádný přenos krouticího momentu z pohonné jednotky na pracovní část drtiče a tím zaručilo jeho stabilní provoz.

Pro pohon drtiče byl zvolen elektromotor, a to i na základě poznatků uvedených v teoretické části práce, kde byly popsány jeho výhody, jako je jednoduchost použití, vysoká účinnost, dostupnost. Samotný elektromotor však nemůže být připojen přímo k pracovní hřídeli drtiče, protože jeho výstupní otáčky jsou příliš vysoké a přenášený krouticí moment by byl nedostatečný. Z tohoto důvodu byla mezi motor a pracovní část drtiče zařazena šneková převodovka, která výrazně snižuje otáčky a zároveň zvyšuje krouticí moment na výstupu.

Otvor ve výstupní části šnekové převodovky, do kterého má být zasazena hřídel drtiče, má výrazně větší průměr než samotná hřídel. Zároveň by při přímém propojení obou částí byla celková délka hřídele nevyhovující. Takové řešení by proto nebylo konstrukčně ani funkčně vhodné. Z tohoto důvodu byla do výstupního otvoru šnekové převodovky vložena hřídel odpovídající jejímu průměru. Mezi tuto hřídel a hřídel drtiče byla následně vložena pružná spojka, která vyrovnává rozdíl v průměrech, zajišťuje délkové přizpůsobení a zároveň kompenzuje drobné odchylky v osách obou hřídelí.

Pro přehledné znázornění celého řešení je na obrázku 30 zobrazeno celé propojení hřídele drtiče s pohonnou jednotkou.



Obr. 30 Zjednodušené schéma spojení drtiče a pohonu

(zdroj: vlastní)

Záměrně je na obrázku 30 znázorněna pouze jedna z pracovních hřídelí drtiče a to ta, která je spojena s pohonnou jednotkou pomocí pružné spojky. Druhá hřídel je s ní propojena prostřednictvím dvojice čelních ozubených kol, která jsou upevněna na obou hřídelích a zajišťují přenos rotačního pohybu.

Konkrétní volbě pohonných komponent je podrobně věnována poslední kapitola této práce.

Elektromotor může být připojen do elektrické sítě i bez použití ovládacího zařízení, takové řešení však přináší několik nevýhod. Není umožněna plynulá regulace otáček, motor se po zapnutí ihned rozběhne na plný výkon a změna směru otáčení vyžaduje ruční prohození dvou fází. Pro vyhnutí se těmto problémům, je nejlepším řešením použití frekvenčního měniče. Pro naše potřeby by byl nejvhodnější frekvenční měnič KASTE FL 350, 1,5 kW, 400 V, který odpovídá požadovanému výkonu i napájení. Tento frekvenční měnič, zobrazený na obrázku 31, umožňuje plynulé řízení otáček motoru, změnu směru otáčení pomocí tlačítka a zajištění plynulého rozběhu i doběhu. Zároveň poskytuje ochranu proti přetížení a chybám. Jeho nevýhodou je však vysoká pořizovací cena, která se pohybuje kolem 4000 Kč.



Obr. 31 Frekvenční měnič KASTE FL 350

(zdroj: [41])

8 VOLBA POHONNÝCH KOMPONENT DRTIČE

Tato kapitola je věnována volbě klíčových pohonných komponent, které jsou nezbytné pro správnou funkci drtiče. Patří sem motor, šneková převodovka, pružná spojka, ložisko a hřídel, spojující šnekovou převodovku s pružnou spojkou, která zajišťuje efektivní přenos síly. Správná volba těchto komponent je zásadní a měla by být odůvodněna nebo podložena výpočty.

8.1 Volba Motoru

Pro správnou volbu motoru je nutné nejprve stanovit potřebný výkon, který musí být zajištěn pro efektivní fungování drtiče. Kromě výkonu musí být vhodně zvoleny i otáčky motoru, které mají zásadní vliv na optimální provoz zařízení. Přičemž je nutné u obou parametrů brát v úvahu i případné ztráty v systému.

Při výpočtu požadovaného výkonu motoru je nutné zohlednit parametry týkající se procesu drcení, ale také vlastnosti materiálu, který bude drcen, v našem případě PLA. Patří sem druh materiálu, jeho průtok, hustota a další relevantní faktory.

Výpočet požadovaného výkonu motoru byl proveden podle rovnice (18).

$$P_{cl} = \frac{3 * G_{BD}^2 * G}{m_z * m_p * 2E * \rho} * \left(\frac{X}{x} - 1 \right) =$$

$$= \frac{3 * 70\,000\,000^2 * 0,03}{0,4 * 0,9 * 2 * 3\,500\,000\,000 * 1\,270} * \left(\frac{21}{3} - 1 \right) = 826,8 \text{ W} \quad (18)$$

Kde: G_{BD} – mez pevnosti v tlaku pro materiál PLA [Pa], G – průtok materiálu [kg/s], E – modul pružnosti [Pa], ρ – hustota materiálu [kg/m³], X – velikost částic materiálu před drcením [-], x – velikost částic materiálu po drcení [-], m_z – účinností faktor drtiče [-], m_p – účinností faktor motoru [-]

Motor tedy musí mít minimálně výkon 826,8 W, přičemž je nutné brát v úvahu i možné ztráty v systému. Na základě tohoto výpočtu byl zvolen elektromotor od firmy KASTE, model Elektropřevodovky KASTE 1,1 kW, 400V - FCN050, s výstupními otáčkami 114 ot/min v cenovém rozmezí od 3 500 do 4 500 Kč. Záměrně byly zvoleny nižší otáčky z několika důvodů. Při vyšších otáčkách by mohlo docházet k nekontrolovanému rozptylu materiálu s větší energií, což by zvyšovalo riziko úrazu obsluhy a komplikovalo manipulaci s drtičem. Zároveň by mohlo docházet k zahřívání materiálu, což by mohlo vést k jeho nežádoucímu natavení. Při zaseknutí by byla vyšší pravděpodobnost poškození materiálu

v místě s menším průřezem. Zároveň by se při zatížení motoru zvyšoval jeho krouticí moment, přičemž u vyšších otáček by byl tento nárůst výraznější, což by mohlo vést k většímu namáhání součástí drtiče.



Obr. 32 Elektropřevodovka KASTE 1,1 kW, 400 V – FCN050

(zdroj: [42])

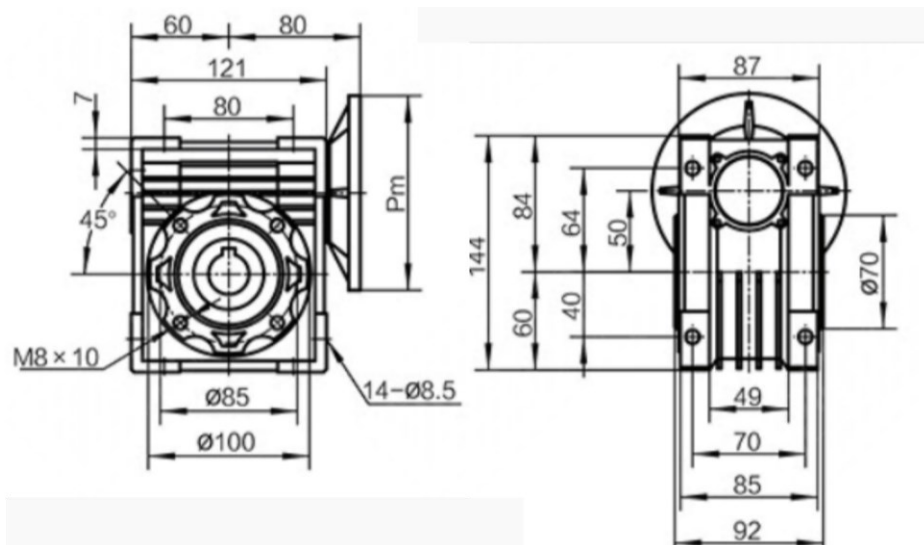
Na obrázku 33 jsou uvedeny základní informace o motoru a šnekové převodovce. Pro návrh je důležitý údaj o průměru otvoru pro hřídel, podle kterého je určena velikost hřídele vystupující ze šnekové převodovky. Dále je uvedeno, že motor je napájen napětím 400 V a odebírá proud 2,6 A, což odpovídá běžné třífázové zásuvce.

Specifikace motoru		Specifikace převodovky	
Účinnost	IE2	Velikost	050
Hřídel	19	Typ příruby	80B14
Osová výška	80	Vstupní hřídel (mm)	19
Proud (A)	2,6	Otvor pro hřídel (mm)	25
Napětí (V)	400		
Váha (kg)	12		
Kostra	hliník		

Obr. 33 Specifikace motoru a šnekové převodovky

(zdroj: [42])

Parametr osová výška, uvedený na obrázku 33, udává výšku hřídele motoru. Z dostupných informací však není zřejmé, v jaké osově výšce se nachází hřídel vystupující ze šnekové převodovky do pružné spojky. Proto bylo nutné kontaktovat výrobce s žádostí o doplnění této informace. Výrobce Kaste poskytl celkové rozměry, které jsou uvedeny na obrázku 34. Z těchto údajů vyplývá, že osová výška hřídele vystupujícího ze šnekové převodovky činí 60 mm.



Obr. 34 Rozměry šnekové převodovky

(zdroj: vlastní)

8.1.1 Kontrola kapacity drtiče

Ve výpočtu (18) byl zvolen průtok materiálu $G = 3 \text{ kg/s}$, což po převedení odpovídá 108 kg/h neboli $1,8 \text{ kg/min}$, což je cíl, který musí drtič splnit. Pro provedení kontroly je nutné znát výstupní otáčky elektropřevodovky, které jsou v tomto případě 114 ot/min .

V prvním kroku kontroly bylo stanoveno množství zpracovaného materiálu na jednu otáčku, jak je uvedeno v rovnici (19).

$$G_{ot} = \frac{G}{n_{výstup}} = \frac{1,8}{114} = 0,0158 \frac{\text{kg}}{\text{ot}} \quad (19)$$

Kde: G_{ot} – množství zpracovaného materiálu na jednu otáčku [kg/ot], G – průtok materiálu [kg/min], $n_{výstup}$ – výstupní otáčky [ot/min]

Dále bylo nutné převést otáčky za hodinu na otáčky za minutu, což provedeme jednoduchým převodem:

$$n_{\frac{výstup}{h}} = n_{výstup} * 60 = 114 * 60 = 6840 \frac{ot}{h} \quad (20)$$

Následně bylo vypočítáno celkové množství zpracovaného materiálu za jednu hodinu:

$$G_{celkové} = n_{\frac{výstup}{h}} * G_{ot} = 6840 * 0,0158 = 108,072 \frac{kg}{h} \quad (21)$$

Kde: $G_{celkové}$ – celkové množství zpracovaného materiálu za hodinu [kg/h], $n_{výstup}$ – výstupní otáčky [ot/h], G_{ot} – množství zpracovaného materiálu na jednu otáčku [kg/ot]

Tento výpočet ukazuje, že kapacita drtiče dosahuje přibližně 108,072 kg/h, což splňuje stanovený cíl 108 kg/h.

8.2 Hřídel

Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly, jedná se o hřídel, která vychází ze šnekové převodovky a je připojena k pružné spojkce. Výhodou je, že výroba této hřídele není nutná, protože je nabízena výrobcem elektropřevodovky jako hotová součást. Na základě údajů získaných z dokumentace motoru a šnekové převodovky byl stanoven požadovaný průměr hřídele 25 mm.

Výrobcem jsou nabídnuty dvě varianty: výstupní hřídel oboustranná 25 mm a výstupní hřídel jednostranná 25 mm. Rozdíl mezi těmito variantami spočívá v přenosu síly. Jednostranná hřídel přenáší sílu pouze z jedné strany, zatímco oboustranná hřídel umožňuje přenos síly z obou stran. Pro naše použití byla zvolena hřídel jednostranná.

8.3 Pružná spojka

Pružná spojka byla zvolena k propojení dvou hřídelí o průměru 18 mm ze strany drtiče a 25 mm ze strany šnekové převodovky. Při jejím výběru bylo nutné zohlednit nejen odpovídající průměry hřídelí, ale také její schopnost přenášet daný krouticí moment. Krouticí moment lze spočítat podle rovnice (23), avšak nejprve bylo nutné upravit výstupní výkon motoru, protože u elektromotoru bylo třeba počítat se ztrátami přibližně 20 %. Z toho důvodu je nejprve proveden převod v rovnici (22).

$$P_{výstup} = 1100 * 0,80 = 880 \text{ W} \quad (22)$$

Nyní, když byl určen reálný výkon 880 W, může být spočítán krouticí moment:

$$M_k = \frac{P_{výstup}}{2 * \pi * n_{výstup}} = \frac{880}{2 * \pi * 1,9} = 73,75 \text{ Nm} \quad (23)$$

Kde: M_k – krouticí moment [Nm], $n_{výstup}$ – výstupní otáčky motoru [ot/min], $P_{výstup}$ – výstupní výkon motoru [W]

Pro zvýšení bezpečnosti byl vypočten i maximální krouticí moment:

$$M_{kmax} = \frac{P}{2 * \pi * n_{výstup}} = \frac{1100}{2 * \pi * 1,9} = 92,19 \text{ Nm} \quad (24)$$

Kde: M_{kmax} – maximální krouticí moment [Nm], $n_{výstup}$ – výstupní otáčky motoru [ot/min], P – výkon motoru [W]

Krouticí moment vyšel 73,75 Nm a maximální krouticí moment 92,19 Nm. Na základě těchto výsledků a průměrů hřídelí byla nalezena vhodná hřídelová pružná spojka 4ME/N-28 od společnosti 4motion, která umožňuje přenos momentu až do 160 Nm. Výrobce bylo sděleno, že skladem jsou dostupné spojky s otvory o průměru 15 mm a 15 mm. Varianta s otvory o průměru 18 mm a 25 mm může být objednána od dodavatele, přičemž cena a krouticí moment zůstává stejný. Tyto informace vycházejí z komunikace se společností 4motion.



Obr. 35 Hřídelová pružná spojka 4ME/N-28

(zdroj: [43])

8.4 Ložisko

Pro uložení hřídele bylo nutné zvolit vhodné ložisko, které by odpovídalo jak průměru hřídele 20 mm, tak konstrukčnímu omezení maximálního vnějšího průměru ložiska 37 mm. Zároveň muselo být zajištěno, že zvolené ložisko bude schopné přenášet požadované

zatížení a odolávat provozním podmínkám. Na základě těchto požadavků bylo jako nejvhodnější varianta vybráno kuličkové ložisko 6904-2RS od společnosti Arkov, které splňuje požadavky a jeho konstrukce je vhodná pro dlouhodobý provoz s minimální údržbou.

Vnitřní průměr [mm]:	20
Vnější průměr [mm]:	37
Šířka [mm]:	9
Radiální vůle:	normální
Druh těsnění:	pryžové
Materiál klece:	ocelová

Obr. 36 Specifikace ložiska 6904-2RS

(zdroj: [44])

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout drtič, který by přispěl k řešení problému neustále narůstajícího množství polymerního odpadu, především v souvislosti s rozšířením technologie 3D tisku.

V teoretické části bylo popsáno rozdělení polymerních materiálů, jejich struktura a problematika jejich recyklace. Dále byly představeny různé typy drtičů, princip jejich fungování a oblasti použití. Pozornost byla věnována také technologii 3D tisku, jejímu vývoji, principům fungování a základním konstrukčním prvkům a zařízením, které jsou klíčové zejména při návrhu hřídelového drtiče a které byly následně využity v praktické části.

Praktická část se zaměřila na konstrukční návrh celého zařízení. Nejprve byl navržen dvouhřídelový drtič se všemi součástmi nezbytnými pro jeho správnou funkci. Pro jednotlivé komponenty byly provedeny pevnostní a kapacitní výpočty. V případech, kde nebylo možné nebo nutné provádět výpočty, byla volba konkrétního řešení zdůvodněna na základě odborných studií, konstrukčních požadavků nebo údajů od výrobců. Následně byl navržen způsob mechanického propojení mezi drtičem a pohonnou jednotkou, a to včetně přenosu krouticího momentu. V závěru se praktická část zabývala výběrem vhodných pohonných komponent, u nichž byly rovněž provedeny příslušné výpočty, případně byla jejich volba podložena technickými údaji. Celý návrh byl realizován v softwaru Solid Edge 2022, ve kterém byla rovněž vytvořena výkresová dokumentace navržených částí.

Výsledkem je funkční návrh zařízení, který by měl spolehlivě plnit svou funkci drcení polymerních výtisků a tím přispívat k odpovědnému a efektivnímu nakládání s odpady v menších, nebo středních provozech.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. přeprac. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006. ISBN 80-7080-617-6. Dostupné také z: <https://kramerus.techlib.cz/kramerus-web-client/uuid/uuid:35816d67-d780-48df-a523-4865ef0849b1>.
- [2] LENFELD, Petr. Zpracování plastů – Skripta. Online. Technická univerzita Liberec Fakulta strojní, 2015. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/uvod.htm. [cit. 2025-01-18].
- [3] EVROPSKÝ ÚČETNÍ DVŮR. Opatření EU k řešení problematiky plastového odpadu. Online. 2020. Dostupné z: https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/rw20_04/rw_plastic_waste_cs.pdf. [cit. 2025-01-21].
- [4] EUROSTAT. 41% of plastic packaging waste recycled in 2022. Online. 2024. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20241024-3>. [cit. 2025-01-22].
- [5] OKUSANYA, Muiyiwa A. a IBRAHIM, Gbenga W. Design and Development of Plastic Crusher for a More Efficient Waste Management Practice. Online. International Journal of Innovative Research and Development. 2020, roč. 9, č. 8. ISSN 2278-0211. Dostupné z: <https://doi.org/10.24940/ijird/2020/v9/i8/AUG20075>. [cit. 2024-10-10].
- [6] KIRANKUMAR, G. Optimization of Jaw Crusher. In: Advance Research and Innovations in Mechanical, Material Science, Industrial Engineering and Management. Bonfring, 2014. ISBN 978-93-82338-97-0.
- [7] WILLS, Barry a NAPIER-MUNN, Tim. Mineral Processing Technology. Seventh edition. Elsevier Science & Technology Books, 2006. ISBN 0750644508.
- [8] Jaw Crusher. Online. In: SaVRee. 2024. Dostupné z: <https://savree.com/en/encyclopedia/jaw-crusher>. [cit. 2024-10-13].
- [9] MONCADA, Manuel; TOLEDO, Patricio; BETANCOURT, Fernando a RODRÍGUEZ, Cristian G. Torque Analysis of a Gyratory Crusher with the Discrete Element Method. Online. Minerals. 2021, roč. 11, č. 8. ISSN 2075-163X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/min11080878>. [cit. 2024-10-14].

- [10] YU, Luo-jian a TONG, Xin. Study on the technical parameters model of the functional components of cone crushers. Online. Nonlinear Engineering. 2022, roč. 11, č. 1, s. 175-185. ISSN 2192-8029. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/nleng-2022-0022>. [cit. 2024-10-20].
- [11] Cone Crushers Explained. Online. In: SaVRee. 2024. Dostupné z: <https://savree.com/en/encyclopedia/cone-crusher>. [cit. 2024-10-21].
- [12] Impact Crusher. Online. In: JXSC. 2024. Dostupné z: <https://www.jxscmine.com/stone-crusher/impact-crusher/>. [cit. 2024-10-21].
- [13] SUN, Ke; ZHAO, Limei a LONG, Qitao. Optimization of Process Parameters for a Vertical Shaft Impact Crusher through the CFD-DEM Method. Online. Manufacturing Technology. 2024, roč. 24, č. 2, s. 279-288. ISSN 12132489. Dostupné z: <https://doi.org/10.21062/mft.2024.028>. [cit. 2024-10-29].
- [14] YANG, J H; FANG, H Y a LUO, M. Load and wear experiments on the impact hammer of a vertical shaft impact crusher. Online. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015, roč. 103. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/103/1/012041>. [cit. 2024-10-29].
- [15] BABELE, Vivek. A Review Study on the Proposed Model for a Multilevel Horizontal Shaft Impact Crusher. Online. International Journal of Engineering Technology and Applied Science. 2016. ISSN 2395 3853. Dostupné z: https://www.academia.edu/69230511/A_Review_Study_on_the_Proposed_Model_for_a_Multilevel_Horizontal_Shaft_Impact_Crusher. [cit. 2024-11-2].
- [16] LIEBERWIRTH, Holger; HILLMANN, Philipp a HESSE, Max. Dynamics in double roll crushers. Online. Minerals Engineering. 2017, roč. 103-104, s. 60-66. ISSN 08926875. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.009>. [cit. 2024-11-15].
- [17] DUNNE, Robert C.; KAWATRA, S. Komar a YOUNG, Courtney A. SME MINERAL PROCESSING & EXTRACTIVE METALLURGY HANDBOOK. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2019. ISBN 978-0-87335-385-4.
- [18] VATSKICHEVA, Malina a GRIGOROVA, Irena. Chassis loading investigation of two-shaft shredder for construction waste management. Online. Recyklaza i održivi razvoj.

- 2017, roč. 10, č. 1, s. 15-21. ISSN 1820-7480. Dostupné z: <https://doi.org/10.5937/ror1701015V>. [cit. 2024-11-25].
- [19] AMGPLASTECH. How Does the Double Shaft Shredder Work? Online. 2024. Dostupné z: <https://amgplastech.com/how-does-the-double-shaft-shredder-work/>. [cit. 2024-11-17].
- [20] STRÍTESKÝ, Ondřej; PRŮŠA, Josef a BACH, Martin. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. Praha: Prusa Research, 2020.
- [21] KLOSKI, Liza Wallach a KLOSKI, Nick. Začínáme s 3D tiskem. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [22] SILVA, Rúben; SERENO, Pedro; MATEUS, Artur; MITCHELL, Geoffrey R.; CARREIRA, Pedro et al. Adaptive Platforms and Flexible Deposition System for Big Area Additive Manufacturing (BAAM). Online. Applied Mechanics and Materials. 2019, roč. 890, s. 3-20. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.890.3>. [cit. 2025-01-24].
- [23] SAVINI, A. a SAVINI, G.G. A short history of 3D printing, a technological revolution just started. Online. In: 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON). IEEE, 2015, s. 1-8. ISBN 978-1-5090-0065-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/HISTELCON.2015.7307314>. [cit. 2025-01-24].
- [24] ČUMA, Zdeněk. 3D FDM tiskárna s výměnnou tiskovou hlavou. Online, DIPLOMOVÁ PRÁCE, vedoucí Oskar Zemčík. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ: FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, 2021. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/4f4f30c9-5b49-494a-9ecb-d8cfbd27ff46/content>. [cit. 2025-01-28].
- [25] 3D STISK. *3D tisk: Jak recyklovat materiály udržitelným způsobem*. Online. 2025. Dostupné z: https://3dstisk.cz/uncategorized/3d-tisk-jak-recyklovat-materialy-udrzitelnym-zpusobem/?srsltid=AfmBOoqnK9D-1xD5SKdACzlFr4aH_dRgBMrcJBHiJUkgw2iE5Ic63Mje. [cit. 2025-02-18].
- [26] Nové metody a postupy v oblasti přístrojové techniky, automatického řízení a informatiky 2022: sborník odborného semináře : 23.5.-25.5. 2022, Ledec nad Sázavou. Praha : České vysoké učení technické, 2022. ISBN 978-80-01-07050-5.

- [27] ŠIMON, Josef. Jak se dělá elektromotor. Online. Elektro. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42921.pdf>. [cit. 2025-02-14].
- [28] Influence of materials on the efficiency of worm gear transmission. Online. *Conference: 6th International Scientific Conference "COMETa 2022"*. 2022. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/365925994_Influence_of_materials_on_the_efficiency_of_worm_gear_transmission. [cit. 2025-02-18].
- [29] INDUSTRIAL EQUIPMENT SPECIALIST. *What is a Worm Gearbox and How Does It Operate ?*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.chinachenyue.com/sys-nd/58.html>. [cit. 2025-02-22].
- [30] LEVNÉELEKTROMOTORY.CZ. *Elektromotor KASTE 0,18kW, 1310 ot. min-1*. Online. 2025. Dostupné z: https://www.levne-elektromotory.cz/1400-otmin/2068-1126-elektromotor-kaste-018kw-1310-ot-min-1.html#/199-provedeni-patkove_b3. [cit. 2025-05-14].
- [31] TYMA CZ. Ozubená kola s čelními zuby. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/produkty/ozubena-kola-a-hrebeny/ozubena-kola/>. [cit. 2025-02-17].
- [32] GUPTA, Kapil; JAIN, Neelesh Kumar a LAUBSCHER, Rudolph. *Advanced Gear Manufacturing and Finishing*. Online. 2017. ISBN 978-0-12-804460-5. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128044605/advanced-gear-manufacturing-and-finishing#book-description>. [cit. 2025-02-22].
- [33] HOU, Nan; DING, Ning; QU, Shen; GUO, Weimin; LIU, Long et al. Failure modes, mechanisms and causes of shafts in mechanical equipment. Online. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135063072200190X?via%3Dihub>. [cit. 2025-02-23].
- [34] ELEKTRONICKÁ UČEBNICE. *Výkres hřídele*. Online. 2025. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/vykres-hridele>. [cit. 2025-02-23].
- [35] VELIČKOVÁ, Eva. *Stroje a zařízení Části strojů*. Online. Ostrava: VŠB - TU OSTRAVA, Fakulta bezpečnostního inženýrství, 2012. Dostupné z: <https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/040/.content/galerie-souboru/studijni-materialy/castistroju.pdf>. [cit. 2025-02-23].

- [36] RS COMPONENTS. *Valivé ložisko NU 204 ECP/C3 SKF*. Online. 2025. Dostupné z: <https://cz.rs-online.com/web/p/valeckova-loziska/1959658>. [cit. 2025-02-28].
- [37] ARKOV. *Ozubené kolo čelní M2.5 Z16 s nábojem ITALY ozubené kolo, modul 2.5, 16 zubů, s nábojem, ocel C45 - UNI7845*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.arkov.cz/p/ozubene-kolo-celni-m2-5-z16-s-nabojem-ozubene-kolo-modul-2-5-16-zubu-s-nabojem-ocel-c45-uni7845-italy-231702>. [cit. 2025-04-08].
- [38] LEINVEBER, Jan a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. Úvaly: Albra, 2003. ISBN 80-864-9074-2.
- [39] ARKOV. *DIN 6885A 6x6x36 Pero těsné zaoblené, tolerance h9, bez povrchové úpravy*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.arkov.cz/p/din-6885a-6x6x36-pero-tesne-zaoblene-tolerance-h9-bez-povrchove-upravy---140334>. [cit. 2025-05-07].
- [40] AUTI, S.M.; SHETH, J.; TULASYAN, P.; GAIKWAD, A. a BAGWE, P. *Design of Shredder Machine for ELV Tyres*. Online. Proceedings of International Conference on Intelligent Manufacturing and Automation. Singapore: Springer, 2020. ISBN 978-981-15-4485-9. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4485-9_64. [cit. 2025-04-26].
- [41] LEVNÉELEKTROMOTORY.CZ. *Frekvenční měnič KASTE FL 350*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.levne-elektromotory.cz/fl-350-400v/1895-frekvencni-menic-15kw-400v.html>. [cit. 2025-05-09].
- [42] LEVNÉELEKTROMOTORY.CZ. *Elektropřevodovky KASTE 1,1kw*. Online. 2025. Dostupné z: https://www.levne-elektromotory.cz/komplety-400v-trojfazove/2031-251-elektroprevodovky-kaste-11kw-400v-fcn063.html#/220-vystupni_otacky_elektroprevodovky-114_ot_min_1_25. [cit. 2025-05-09].
- [43] 4MOTION. *Hřidelová pružná spojka 4ME/N-28*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.4mo.cz/hridelove-pruzne-spojky/>. [cit. 2025-05-09].
- [44] ARKOV. *6904-2RS (61904-2RS) EZO kuličkové ložisko*. Online. 2025. Dostupné z: [https://www.arkov.cz/p/6904-2rs-\(61904-2rs\)-kulickove-lozisko-ezo-179071](https://www.arkov.cz/p/6904-2rs-(61904-2rs)-kulickove-lozisko-ezo-179071). [cit. 2025-05-09].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Grafické rozdělení polymerů	13
Obr. 2 Vyprodukovaný polymerní odpad v EU podle odvětví v roce 2018	15
Obr. 3 Odpad z plastových obalů produkovaný a recyklovaný v EU (2012-2022).....	16
Obr. 4 Schéma čelistového drtiče.....	17
Obr. 5 Schéma kruhového drtiče.....	18
Obr. 6 Řez kuželového drtiče.....	19
Obr. 7 Popis nárazového drtiče	20
Obr. 8 Různé typy hřídelových drtičů:.....	21
Obr. 9 Klíčové komponenty dvouhřídelového drtiče.....	22
Obr. 10 Schéma drtiče Rhodax a princip činnosti	23
Obr. 11 Stereolitografický přístroj od Charlese W. Hulla	24
Obr. 12 Kartézská tiskárna – ukázka pohybu os X, Y a Z při 3D tisku.....	26
Obr. 13 Delta tiskárna – tisk s pohybem tří ramen	27
Obr. 14 Ukázka polar tiskárny	27
Obr. 15 Princip technologií laserové SLA, DLP a MSLA.....	28
Obr. 16 Elektromotor od firmy KASTE	29
Obr. 17 Ukázka ozubeného kola modul 1	31
Obr. 18 Pohled na hřídel	31
Obr. 19 Valivé ložisko (NU 204 ECP/C3 SKF)	32
Obr. 20 Sestava drtiče	35
Obr. 21 Hřídel drtiče	36
Obr. 22 Schéma zatížení hřídele	37
Obr. 23 Parametry ozubeného kola.....	39
Obr. 24 Úprava ozubeného kola	40
Obr. 25 Strojnické tabulky volba pera	41
Obr. 26 Pero těsné DIN 6885A 6x6x36.....	41
Obr. 27 Strojnické tabulky volba pojistného kroužku	43
Obr. 28 Geometrie řezného nože	44
Obr. 29 Model násypky a víka	45
Obr. 30 Zjednodušené schéma spojení drtiče a pohonu.....	46
Obr. 31 Frekvenční měnič KASTE FL 350	47
Obr. 32 Elektropřevodovka KASTE 1,1 kW, 400 V – FCN050	49
Obr. 33 Specifikace motoru a šnekové převodovky	49
Obr. 34 Rozměry šnekové převodovky.....	50

Obr. 35 Hřídelová pružná spojka 4ME/N-28.....	52
Obr. 36 Specifikace ložiska 6904-2RS	53

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Trojrozměrný prostor
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
PA	Polyamid
T _g	Teplota skelného přechodu
PMMA	Polymethylmethakrylát
%	Procenta
T _m	Teplota tání
PTFE	Polytetrafluorethylen
POM	Polyoxymethylen
EU	Evropská unie
ot/min	Otáčky za minutu
FFF	Výroba z tavného vlákna
SLA	Stereolitografie
CAD	Počítačově podporované navrhování
CAM	Počítačově podporovaná výroba
mm	Milimetr
PLA	Polylaktidová kyselina
ABS	Akrylonitril butadien styren
UV	Ultrafialové záření
DLP	Stereolitografie digitálního zpracování světla
MSLA	Stereolitografie s maskou
∅	Průměr

MPa	Megapascal
Pa	Pascal
$d_{\min}$	Minimální průměr hřídele
M_k	Krouticí moment
τ_d	Mez únavy v krutu
Nm	Newtonmetr
F	Výslednice sil
z	Počet nožů
$m_{nůž}$	Hmotnost jednoho nože
kg	Kilogram
N	Newton
$m_{hřídel}$	Hmotnost hřídele
g	Gravitační zrychlení
m/s^2	Metr za sekundu na druhou
R_a	Reakce v ložisku A
R_b	Reakce v ložisku B
l	Celková vzdálenost mezi ložisky
b	Vzdálenost ložiska od středu
$M_{\max}$	Maximální ohybový moment
a	Vzdálenost ložiska od středu
σ_o	Ohybové napětí
Nmm	Newtonmilimetr
W_o	Průřezový modul v ohybu
mm^3	Milimetr krychlový
d	Šířka šestihranu
τ_k	Smykové napětí

W_k	Polární modul průřezu
σ_{RED}	Redukované napětí
σ_{tDOV}	Dovolené napětí v tahu
d	Roztečný průměr kola
m	Modul ozubeného kola
z	Počet zubů
a	Osová vzdálenost mezi dvěma ozubenými koly
$d_{drážky}$	Průměr hřídele po odečtení velikosti drážky
d	Průměr hřídele před odečtením drážky
t	Velikost drážky
F	Zatěžující síla
S	Kontaktní plocha mezi perem a drážkou
t_1	Hloubka drážky v náboji
l	délka pera
p_D	Dovolený tlak v oceli
κ_τ	Součinitel velikosti pro krut u legované oceli
β_τ	Vrubový součinitel v krutu pro ocel
τ	Smykové napětí v krutu
k	Bezpečnostní součinitel
$^\circ$	Stupeň
kW	Kilowatt
V	Volt
$Kč$	Koruna česká
G_{BD}	Mez pevnosti v tlaku
G	Průtok materiálu
E	Modul pružnosti

ρ	Hustota materiálu
X	Velikost částic materiálu před drcením
x	Velikost částic materiálu po drcení
m_z	Účinností faktor drtiče
m_p	Účinností faktor motoru
kg/m^3	Kilogram na krychlový metr
kg/s	Kilogram za sekundu
W	Watt
A	Ampér
G_{ot}	Množství zpracovaného materiálu na jednu otáčku
$n_{\text{výstup}}$	Výstupní otáčky
$G_{\text{celkové}}$	Celkové množství zpracovaného materiálu za hodinu
$P_{\text{výstup}}$	Výstupní výkon motoru
M_{kmax}	Maximální krouticí moment
P	Výkon motoru
aj.	A jiné

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výkresová dokumentace drtiče

