



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE DRTIČE PLASTOVÉHO ODPADU
PO 3D TISKU**

DESIGN OF SHREDDER OF 3D PRINTING PLASTIC PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Lollek

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Křivohlavý

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Petr Lollek**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Křivohlavý**
Akademický rok: 2022/23

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

Konstrukce drtiče plastového odpadu po 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie 3D tisku metodou FDM se vyznačuje nízkým procentem odpadu. I tak zde vzniká odpad v podobě podpor, nepovedených výtisků nebo prototypů, které už nemají další využití. Z těchto kusů plastů lze následně vyrobit drť, vhodnou pro další zpracování. Například je možné drť použít pro 3D tisk pomocí šnekového extrudéru, nebo jako vstupní surovinu pro výrobu nového filamentu.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je navrhnout drtič plastového odpadu vzniklého při 3D tisku na drť vhodnou pro další využití

Díličí cíle bakalářské práce:

- rešerše, identifikace klíčových konstrukčních uzlů,
- návrh variant řešení,
- výběr a zpracování nejvhodnější varianty.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

PAKKANEN, Jukka, Diego MANFREDI, Paolo MINETOLA a Luca IULIANO. About the use of recycled or biodegradable filaments for sustainability of 3D printing: State of the art and research opportunities. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2017, roč. 68, č. April, s. 776–785. ISSN 21903026.

OGUNEDO, Briggs M a Beneth C CHUKWUDI. Design and Construction of a Low Cost Plastic Shredding Machine. International Journal of Research and Review (ijrrjournal.com). 2020, roč. 7, č. 9, s. 374. ISSN 2454-2237.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem drtiče plastového odpadu vznikající 3D tiskem. Cílem práce je návrh konstrukce drtiče, jehož výstupem je drť, kterou je vhodné použít pro výrobu tiskové struny. První část práce je tvořena rešerší různých typů drtičů, analýzou základních metod aditivní technologie, nejčastěji používaných materiálů FDM technologie a odpadu z nich vznikajících. Druhá část následně vyhodnocuje koncepční varianty. Nejvhodnější varianta je zvolena pomocí kritérií stanovených na základě provedené rešerše a cílů práce. Praktická část se pak zabývá kontrolními výpočty a samotným konstrukčním návrhem finální varianty složené ze čtyř hlavních sestav (pohonné jednotky, sestavy drtiče, rámu a krytování).

KLÍČOVÁ SLOVA

Drtič plastu, Recyklace, Plasty, 3D tisk

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the structural design of a shredder for plastic waste generated by 3D printing. The aim of the thesis is the design of a shredder whose output can be used to produce printing filament. The first part of the thesis consists of research of different types of shredders, an analysis of the basic methods of additive technology, the most used materials of FDM technology and the waste generated from them. The second part then evaluates conceptual options. The most suitable option is selected using the criteria established based on the conducted research and the objectives of the thesis. The practical part then deals with the verifying calculations and the actual structural design consisting of four main parts (drive unit, shredder assembly, the frame and enclosure)

KEYWORDS

Plastic shredder, Recycling, Plastic, 3D printing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Lollek, Petr. *Konstrukce drtiče plastového odpadu po 3D tisku*. Brno, 2023, 99 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Křivohlavý.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Křivohlavému za odborné vedení a užitečné rady. Dále bych chtěl poděkovat rodině, která mě po celou dobu studia podporovala a přátelům, kteří při mně stáli.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Petra Křivohlavého. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

ABSTRAKT	4
KLÍČOVÁ SLOVA	4
ABSTRACT	4
KEYWORDS	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	5
PODĚKOVÁNÍ	6
PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE	6
OBSAH7	
1 ÚVOD	9
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	10
2.1 Drtiče	10
2.2 Komerční řešení drtičů odpadů	17
2.3 Aditivní technologie neboli 3D tisk	19
2.4 Výběr a rozbor součástí vhodného typu drtiče	23
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	26
3.1 Analýza problému	26
3.2 Cíl práce	27
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	28
4.1 První varianta	28
4.2 Druhá varianta	29
4.3 Třetí varianta	30
4.4 Čtvrtá varianta	31
4.5 Vícekriteriální analýza	32
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	35
5.1 Výpočet střižných podmínek	36

5.2	Volba pohonu drtiče	38
5.3	Spojení pohonu a hřídele drtiče	39
5.4	Hřídel drtiče	40
5.5	Sestava drtiče	48
5.6	Rám	54
5.7	Krytování	58
6	DISKUZE	59
7	ZÁVĚR	60
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	63
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	66
11	SEZNAM TABULEK	69
12	SEZNAM PŘÍLOH	70

1 ÚVOD

Plastový odpad je v dnešní době známým ekologickým problémem, který je potřeba řešit. S nárůstem popularity 3D tisku se problém s množstvím plastového odpadu zvyšuje. Kvůli specifickým vlastnostem plastů se často stává, že vzniklý odpad je obtížné recyklovat tradičním způsobem. Proto je potřeba vyvíjet inovativní technologie a zařízení, která umožní efektivní zpracování plastového odpadu.

Cílem této bakalářské práce je analyzovat problémy zpracování odpadu a volby vhodného typu drtiče. Následně se práce věnuje návrhu konstrukce vybraného typu drtiče, který je schopen efektivně rozdrtit nejčastěji používané materiály při 3D tisku technologií FDM a připravit tak plastový odpad k dalšímu zpracování. Při zpracování návrhu konstrukce je kladen důraz na velikost výstupní drtě, velikost drtícího prostoru a celkové rozměry sestavy.

První část práce obsahuje rešerši rozebírající jednotlivé typy drtičů a stručný úvod do aditivní technologie. Na základě rešeršní části je vybrán vhodný typ drtiče a jsou provedeny koncepční návrhy, kdy pomocí vícekritériální analýzy je zvolena nejlepší varianta pro konstrukční část.

Začátek následující kapitoly je věnován analýze problému, která je zaměřena na identifikaci klíčových konstrukčních uzlů a následně je zformulován cíl práce.

Další kapitola je věnována koncepčním řešením. V uvedené části práce jsou definovány čtyři možnosti řešení a pomocí vícekritériální analýzy je vybrána nejvhodnější varianta konstrukčního řešení.

Poslední kapitola je zaměřena na detailní rozbor vybrané nejvhodnější varianty. Uvedená část bakalářské práce se na začátku věnuje výpočtu střižných podmínek, dle kterých se vybere vhodný pohon drtiče. Na závěr se práce zaměřuje výpočty bezpečností na hřídeli drtiče a následném sestavení konstrukčních částí do celku.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Drtiče

Drtiče a mlýny jsou strojní zařízení sloužící k mechanickému zdrobňování při úpravě, respektive likvidaci průmyslových a městských odpadů. Tuto funkci dále plní i speciální zdrobňovací stroje a mechanismy. Dosavadní úprava a zpracování vychází z klasických úprav a postupů při zpracování rudných i nerudných surovin apod., kde hlavním cílem úpravy je dosažení potřebné konzistence, tvaru, objemu atd. upravovaného materiálu. Tyto stroje musí svou konstrukcí a provedením odpovídat druhu a vlastnostem zdrobňovaných surovin. Jako pracovní elementy se používají trhací zuby, nože, hroty, nůžky aj. těmto elementům podobné. Pracovní elementy se vyrábějí z oceli s 0,8 až 1,5 % uhlíku. Příkladově 0 až 2 % manganu, chromu nebo 0,2 % vanadu výrazně zlepšují tvrdost pracovních elementů. Také slitiny obsahující 3 až 6 % wolframu vykazují vynikající vlastnosti. [1]

Při zdrobňování se nejvíce uplatňuje namáhání tlakem, smykem a z části i na ohyb. V drtičích a mlýnech se uplatňují různé způsoby namáhání jednotlivých zrn současně. Protože se většinou zdrobňuje velký počet zrn, dochází k vzájemným nárazům nebo otírání, což také pomáhá ke zdrobňování. [1]

Hranice mezi drcením a mletím určuje velikost rozpojeného zrna a je uvedena v Tab. 2-1, která také obsahuje údaje o volbě typu drtiče a mlýna. Pro volbu drtiče nebo mlýna jsou rozhodující především: fyzikální vlastnosti zdrobňovaného materiálu, velikost zrn produktu před a po zdrobňování, ale také požadovaný výkon v m^3/h nebo t/h . [1]

Tab. 2-1 Hranice velikosti zrna při zdrobňování [1]

Stupeň rozpojování	Zrnitost produktu	Optimální typ drtiče nebo mlýna	
-	mm	-	
Drcení	Hrubé	nad 125	Čelistový, kuželový ostroúhlý drtič
	Střední	nad 25	Kuželový tupoúhlý drtič
	Jemné	do 25	Kladivový, odrazový, válcový drtič
Mletí	Hrubé	do 3 (do 6)	Tyčový, autogenní mlýn
	Střední	0,08 - 0,8	Kulový, bubnový, autogenní mlýn
	Jemné	0,03 - 0,08	Kulový – troubový mlýn
	Velmi jemné	0,01 - 0,03	Kulový – troubový, vibrační mlýn
		0,003 - 0,01	Tryskový, koloidní mlýn

Jedním z hlavních technických charakteristik drtičů a mlýnů je tzv. stupeň mletí, respektive stupeň drcení (zdrobnění). Rozmezí stupně drcení jednotlivých drtičů je uveden v Tab. 2-2. Stupeň drcení lze určit poměrem maximální velikosti zrna před a po zdrobnění:

$$s = \frac{z_1}{z_2} \quad (1)$$

kde s – stupeň drcení,

z_1 – maximální velikost zrna před zdrobněním,

z_2 – maximální velikost zrna po zdrobnění. [1]

Tab. 2-2 Stupeň zdrobnění drtičů a mlýnů [1]

Druh zdrobnovacích strojů	Stupeň zdrobnění
Čelistové drtiče	3–6
Kuželové drtiče	5–7
Kuželové drtiče tupouhlé	5–20
Válcové drtiče s hladkými válci	3–4
Válcové drtiče s ostnatými válci	8–10
Kladivové drtiče jednorotorové	10–15
Odrázové drtiče a mlýny	10–40
Tyčové mlýny	12–30
Kulové mlýny	větší než 50–100
Autogenní mlýny	větší než 80–200

Obdobně lze zdrobnovací efekt vyjádřit redukčním poměrem podle vztahu:

$$R_{80} = \frac{D_{80}}{d_{80}} \quad (2)$$

kde R_{80} – redukční poměr,

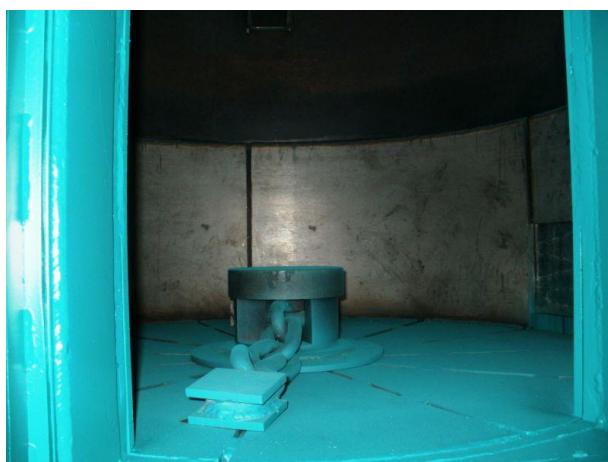
D_{80} – okatost síta, jímž propadne 80 % (hmotnostních) materiálu před zdrobněním (mm),

d_{80} – okatost síta, jímž propadne 80 % materiálu po zdrobnění (mm). [1]

V dnešní době se spotřebovává velké množství odpadu různého druhu jako je sklo, plast, papír, různé kovy, nebo dřevo a kůže. Proto jsem v následující části uvedl nejčastější typy drtičů, které se objevují jak v běžném výrobním provozu, tak i v domácnostech. U každého typu je uvedena funkce drcení a použití.

2.1.1 Bubnové drtiče

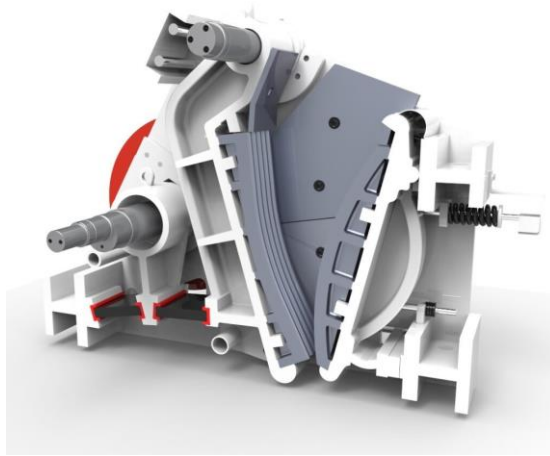
Tento typ drtiče pracuje při vysokých otáčkách pracovního nástroje uvnitř bubnu, který naráží na drcený materiál. Typicky se jedná o řetěz viz Obr. 2-1, který je jako pracovní nástroj levný a snadno vyměnitelný. Bubnové drtiče vynikají vysokou účinností z hlediska separace jednotlivých materiálů a narušení jejich struktury [2]. Jsou tedy vhodné pro drcení kompozitních materiálů.



Obr. 2-1 Pracovní prostor bubnového drtiče [2]

2.1.2 Čelistové drtiče

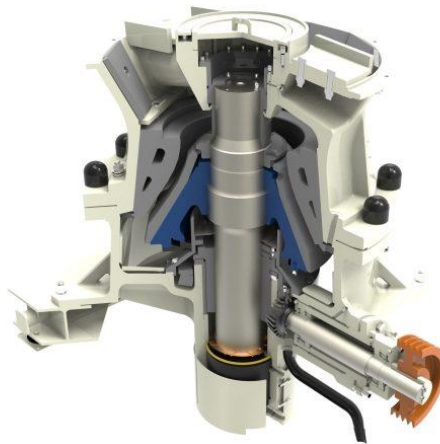
Drcení materiálu zde probíhá v drticím prostoru mezi vzájemně přibližujícími se čelisti viz Obr. 2-2. Pohyblivá čelist je upevněna na kyvadlu a spolu s ním vykonává kývavý pohyb. Kývavý pohyb čelisti je vyvoláván nepřímo pákovým mechanismem složeným z ojnice a dvou vzpěrných desek [1]. Při oddalování dochází k propadu nadrceného materiálu vlivem zvětšení klínové mezery. Nejčastěji se používají pro drcení velmi pevných a těžce drtitelných materiálů, proto jsou čelisti zhotoveny z tvrdé ořezové manganové oceli a mohou být opatřeny rýhováním [3].



Obr. 2-2 Řez čelistového drtiče [4]

2.1.3 Kuželové drtiče

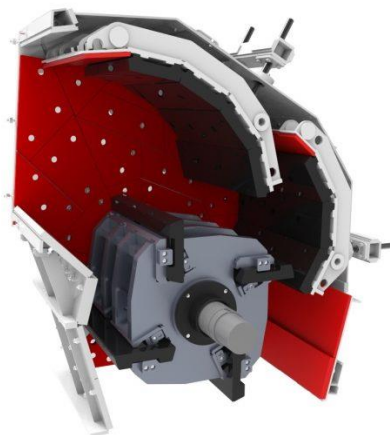
Také někdy pod názvem excentrické drtiče využívají rotujícího komolého kužele a pevného prstencového pláště k drcení materiálu právě mezi těmito plášti. Pláště také často bývají opatřeny rýhováním. Kužel je na horním konci kloubově uložen a dolní konec mimostředně rotuje [3]. Tím se na jedné straně mezera zmenšuje a drtí materiál, na druhé straně se zvětšuje a umožňuje rozdrčenému materiálu mezerou propadat. Používají se převážně pro drcení hornin. Podle tvaru drtících kuželů se dělí kuželové drtiče na ostroúhlé nebo tupoúhlé [1]. Řez kuželovým drtičem je uveden na Obr. 2-3.



Obr. 2-3 Řez kuželového drtiče [4]

2.1.4 Odrazové drtiče

Drcení probíhá pomocí rotoru osazeného lopatkami, které při vysokých otáčkách vrhají materiál do nárazových desek, materiál zároveň naráží sám do sebe a tím se drtí. Nárazové desky jsou vyměnitelné a jsou vyrobené z tvrdé ořezuvzdorné manganové oceli [3]. Tento typ drtiče se využívá i pro drcení tvrdých hornin. Příklad odrazového drtiče je uveden na Obr. 2-4.



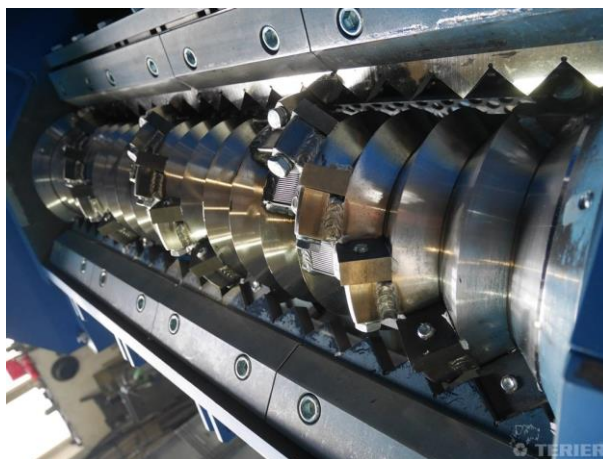
Obr. 2-4 Náhled do pracovního prostoru odrazového drtiče [4]

2.1.5 Hřídelové drtiče

Hřídelové drtiče materiál spíše krájí a řezají než drtí (zdrobňují), jak je uvedeno na typech výše. Jejich konstrukce se dělí na jedno, dvou nebo na čtyřhřídelové. Dále se dělí na speciální, ale ty bývají často jednoúčelové [2]. V Tab. 2-1 nejsou tyto drtiče doplněny, protože jsou modifikovatelné a jejich výstupní frakce se často odvíjí od množství nebo velikosti břitů a segmentů použitých na hřídelích nebo rotoru. Také lze pod tyto drtiče umístit síto, které pomocí velikosti otvorů definuje velikost výstupní frakce.

Jednohřídelové drtiče

Drtiče využívající pouze jednu hřídel pracují na principu stříhání, které probíhá mezi břity umístěnými na otáčejícím se rotoru a ostřím pevné statorové části. Břity jsou často ve formě vyměnitelných destiček, které jsou upevněny na přivařeném držáku (Obr. 2-5), takže při otupení je zajištěna velmi snadná a rychlá výměna [2]. Drtiče se používají pro odpady jako je plast, papír, dřevo a pro různé neforemné kusy odpadu.



Obr. 2-5 Rotor jednohřídelového drtiče [5]

Dvouhřídelové drtiče

Funkce drcení a stříhání dvouhřídelových drtičů spočívá v proti sobě otáčejících se hřídelích opatřených segmenty (noži), které mohou mít různou šířku viz Obr. 2-6. Používají se často na předdrcení odpadu, které dále následuje na drcení nebo mletí najemno [6]. Jsou vhodné pro drcení podobného materiálu jako u jednohřídelových drtičů.



Obr. 2-6 Pracovní prostor dvouhřídelového drtiče [5]

Čtyřhřídelové drtiče

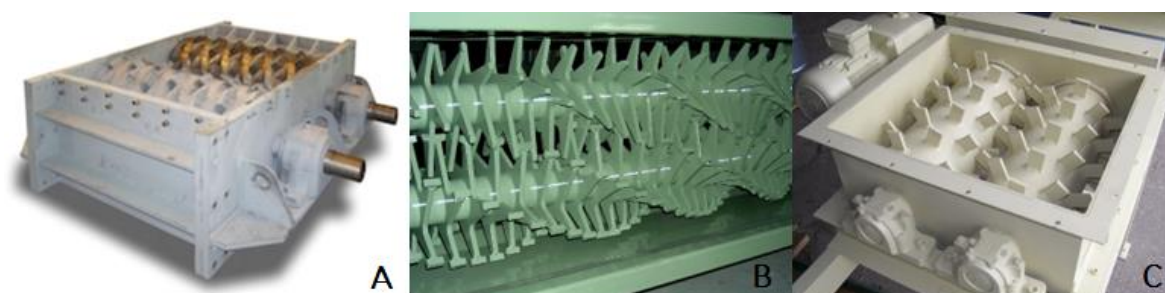
Funkcí se podobají dvouhřídelovým drtičům, a protože mají kvůli dvěma pomocným hřídelím (viz Obr. 2-7) větší pracovní plochu, jsou schopny pojmout objemnější odpad nebo materiál určený k drcení. Často se zde využívá síta, protože pomocné hřídele lépe natáhnou drcený materiál zpět a provedou proces drcení znovu, dokud materiál sítem nepropadne [6].



Obr. 2-7 Pracovní prostor čtyřhřídelového drtiče [7]

Speciální drtiče

Často jsou to drtiče, které jsou konstruovány za účelem zpracování určeného druhu odpadu nebo materiálu určeného k recyklaci. Jsou to třeba drtiče k drcení nemocničního opadu, minerálních vat nebo třeba polystyrenu [6]. Příklady takových drtičů můžete vidět na Obr. 2-8.



Obr. 2-8 Speciální drtiče: A – drtič nemocničního odpadu, B – drtič polystyrenu, C – Drtič skla [2]

2.1.6 Válcové drtiče

Podobají se hřídelovým drtičům. Materiál se zde drtí mezi dvěma proti sobě otáčejícími se válci viz Obr. 2-9. Válce mohou být hladké nebo s vyměnitelnými zuby různých tvarů. Jeden válec bývá pružně uložen a je možné ho posunout [3]. Posuvem válce lze měnit velikost štěrbiny tím se upravuje velikost výstupní frakce. Používá se pouze na drcení měkkých materiálů.



Obr. 2-9 Pohled na pracovní prostor válcového drtiče při instalaci [8]

2.2 Komerční řešení drtičů odpadů

Před samotnými návrhy koncepčních řešení a následné konstrukce drtiče byl proveden průzkum trhu, pomocí kterého byly následně vytvořeny tabulky Tab. 2-3 a Tab. 2-4, které popisují technické specifikace strojů dostupných na trhu. Ovšem tyto produkty nejsou vyráběny firmami, ale byly zkonstruovány spolu s dalšími stroji v rámci projektů bojujících s plastovým odpadem po celém světě. Firmy, které vyrábějí drticí zařízení, jsou převážně zaměřeny na zpracování velkého objemu jakéhokoliv odpadu, a proto by tyto stroje nebyly vhodným příkladem k následnému návrhu konstrukce drtiče.

První uvedený drtič s názvem Shredder Basic (viz Obr. 2-10 č.1) vyrábí Sustainable design studio. Jedná se o studio, které spolupracuje s různými organizacemi a projekty ve snaze přeměnit odpad na výrobky [9]. Další drtiče vznikly v rámci projektu Precious plastic, který nabízí podrobné návody k sestavení mnoha zařízení určené k recyklaci plastového odpadu [10]. Konkrétně drtiče pod názvem Shredder (viz Obr. 2-10 č.2) a Shredder Pro (viz Obr. 2-10 č.3).

Tab. 2-3 Technické specifikace drticích strojů [9, 10]

Model		Shredder Basic	Shredder	Shredder Pro
Počet hřídelí	[-]	1	1	2
Velikost výstupní frakce*	[mm]	5 nebo 8	7,10 nebo 30	7,10 nebo 30
Množství vyprodukovaného odpadu**	[kg/hod]	±20	±10	±27
Výkon elektromotoru	[kW]	1,5	2,2	2,2 nebo 4
Točivý moment	[N m]	-	300	1100-3000
Výstupní rychlost	[ot/min]	-	70	15-25
Hmotnost	[kg]	-	150	340
Cena	[Kč]	cca 70 000	cca 26 000	cca 53 000

* Velikost výstupní frakce se odvíjí velikosti použitého síta

** množství vyprodukovaného odpadu se nejvíce odvíjí od typu drceného materiálu a typu použitých nožů



Obr. 2-10 Drtiče plastového odpadu: 1 – Shredder Basic, 2 – Shredder, 3 – Shredder Pro [9, 10]

Plasticpreneur je rakouský tým, který stejně jako projekt Plastic precious bojuje s plastovým odpadem. Vyvíjí, navrhuje a vyrábí stroje určené k recyklaci, ale také nabízí služby, jako jsou technická školení a pomoc, podnikatelské školení a mnoho dalšího [11]. Technické specifikace jejich produktů, konkrétně drtičů plastového odpadu, jsou popsány v Tab. 2-4. Mezi jejich vyráběnými produkty najdeme jak plně elektrický drtič (Shredder – SMK1.1) viz Obr. 2-11 vlevo, tak i ruční drtič (Manual shredder – MSMK1) viz Obr. 2-11 vpravo. Produkty prošly evropskou certifikací CE, tedy splňují bezpečnostní, zdravotní i enviromentální požadavky EU.

Tab. 2-4 Technické specifikace drtičů plastového odpadu [11]

Model		Shredder – SMK1.1	Manual shredder – MSMK1
Počet hřídelí	[-]	1	1
Velikost výstupní frakce*	[mm]	10	-
Množství vyprodukovaného odpadu	[kg/hod]	±15-30	±1-2
Výkon elektromotoru	[kW]	2,2	-
Hmotnost	[kg]	105	10,7
Cena	[Kč]	cca 160 000	cca 50 000

* Velikost výstupní frakce se odvíjí velikosti použitého síta



Obr. 2-11 Drtiče plastového odpadu firmy plasticpreneur [11]

2.3 Aditivní technologie neboli 3D tisk

Trojrozměrný tisk je technologie, která se využívá pro výrobu složitých geometrických struktur a fyzických modelů z dat trojrozměrného (3D) modelu. Tuto technologii vyvinul Charles Hull v roce 1986, tehdy známou pod pojmem stereolitografie (SLA) na kterou navázal následný vývoj technologií, jako je Fused deposition modelling (FDM) aj. [12]. Aditivní výroba se dnes uplatňuje v různých průmyslových odvětvích, ale taky v medicíně, jako výroba různých prototypů atd. Právě díky své rychlosti výroby se této technologii také říká Rapid prototyping (RP).

Oproti obráběcím technikám, kdy je daný materiál z polotovaru odebírán, u 3D tisku je naopak materiál nanášen na tiskovou plochu vrstvu po vrstvě. Materiálů, kterých se využívá k 3D tisku je široká škála a nechybí zde kovy, beton, keramika ani polymery [12]. Protože se technologie v poslední době velmi rozšířila, nechybí i experimenty s tisknutím různých jídel, jako je např. čokoláda, těsto nebo maso [13].

2.3.1 Základní metody 3D tisku plastu

FDM – Fused deposition modelling

Jedná se o nejrozšířenější technologii v domácnostech. Filament ve formě často plastové struny se v trysce zahřívá, aby dosáhl polotekutého stavu a následně se vytlačuje na tiskovou plochu nebo na nanesené vrstvy. Nanesené vrstvy se během tisku spojí a následně v pokojové teplotě ztuhnou. Kvalita výrobku se odvíjí od kvality konstrukce, správné kalibrace tiskárny a nastavením parametrů použitého materiálu.

SLA – Stereolitografie

Metoda, která používá vytvrzování monomeru za pomoci záření, nejčastěji UV paprsku. Monomery (typicky na bázi akrylu nebo epoxidu) poté co jsou ozářeny UV světlem se okamžitě přemění na polymerní řetězce [14]. Model je následně vytáhnut o výšku vrstvy, aby se pod výrobkem naplavil nevytvrzený monomer a celý proces se následně opakuje, dokud nedojde k vyhotovení výrobku.

SLS – Selective laser sintering

Technologie podobná SLA technologii, ale místo použití kapalného pojiva a UV paprsku je zde použit výkonný laser, který spéká práškový materiál (plast, kov či keramika) [14]. Ten je nanášen po celé tiskové ploše. Po zapečení laserem následně výrobek klesne o výšku vrstvy, aby mohla být nanesena další vrstva a celý proces se opakuje.

2.3.2 Vznik odpadu u FDM technologie

Přestože FDM technologie je technologií tisku, která mnoho odpadu nevyprodukuje, i tak zde nějaký odpad vzniká. Často se jedná o nechtěnou tvorbu odpadu vzniklou chybami tisku, které pak ve většině případů vedou k poškození výrobku a ten je dále nepoužitelný. Mezi takovéto chyby přísluší špatná extruze (tiskárna vytlačuje více nebo málo materiálu, než má), ucpaná tryska, špatná přilnavost vrstev, celkově špatné nastavení tisku jako je rychlost, teplota taveného materiálu a nastavení vedoucí k nesprávnému chodu tiskárny. Dále se odpad produkuje při tvorbě podpor, které jsou naopak chtěné. Tyto podpory jsou generovány programem a jejich množství se odvíjí od složitosti modelu. Jak můžeme vidět na Obr. 2-12, využíváme dvou typů podpor, mřížkové (na Obr. 2-12 vlevo a uprostřed) a stromové podpory (na Obr. 2-12 vpravo). Využíváním vhodnějších typů podpor získáváme jak kratší dobu tisku, tak i méně spotřebovaného materiálu. Šetříme tedy jak naši planetu, tak i peníze [16].



Obr. 2-12 Zobrazení různého nastavení podpor [16]

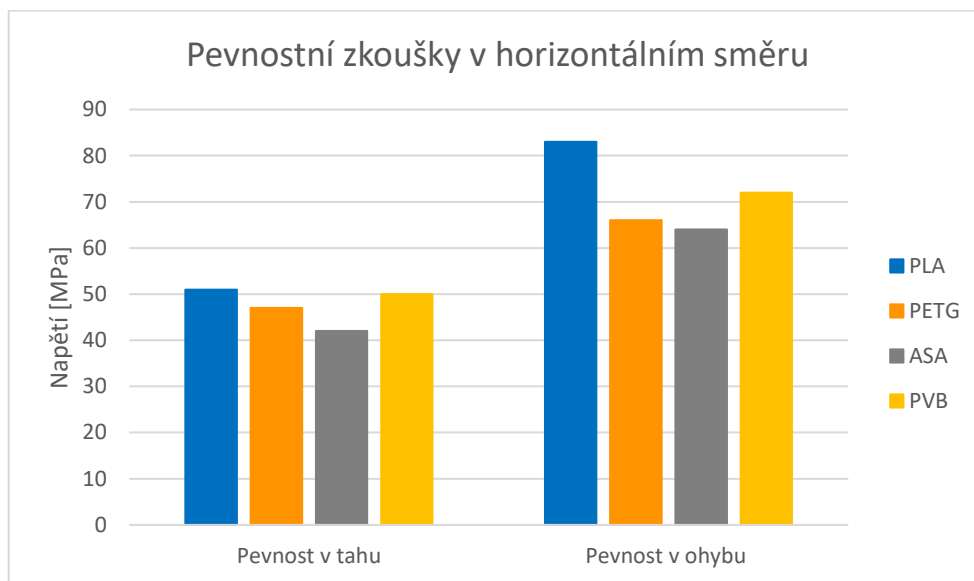
2.3.3 Materiály a jejich mechanické vlastnosti používané FDM technologií

Materiály, které FDM technologie používá jsou převážně různé druhy plastů, jako je PLA, ABS, PET-G, ASA, Nylon a mnoho jiných. Mechanické vlastnosti výrobku se odvíjí od hustoty výplně (%), jeho vzoru (mřížka, trojúhelníkový, kubický aj.) a taky od toho, v jakém směru je daný výrobek tisknut (horizontální, vertikální směr aj.).

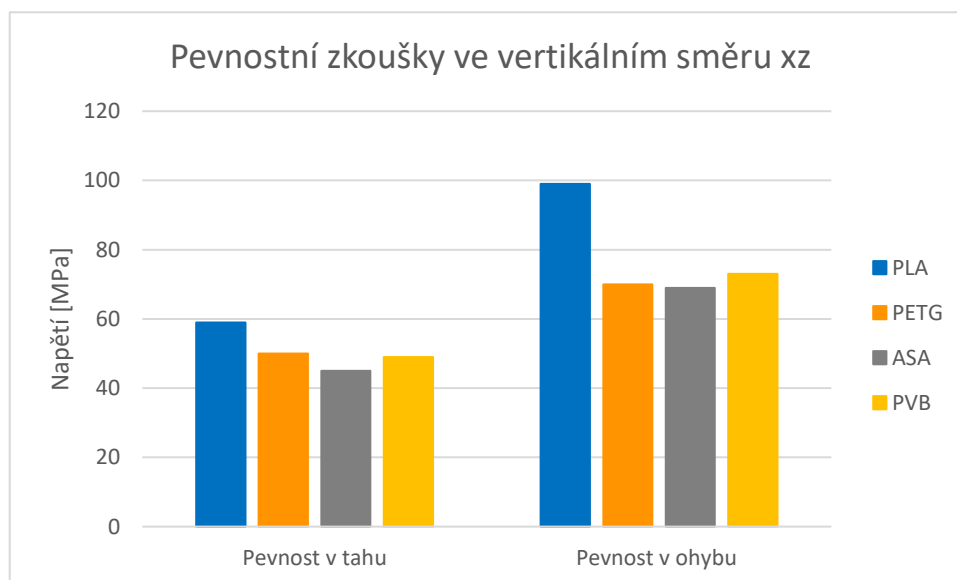
Pomocí technických listů volně dostupných od výrobce PRUSA POLYMERS byla vyrobena tabulka Tab. 2-5 s mechanickými vlastnostmi nejčastěji používaných materiálů tisknutých FDM technologií a pro lepší přehlednost i grafy na Obr. 2-13 a Obr. 2-14. Konkrétně naměřené hodnoty pevnosti v tahu a ohybu. Dále na Obr. 2-16 je zobrazen směr tisku, při kterém byly provedeny pevnostní zkoušky. Tyto mechanické vlastnosti materiálů budou následně využity pro konstrukci drtiče plastového odpadu.

Tab. 2-5 Mechanické vlastnosti materiálů pro 3D tisk [17]

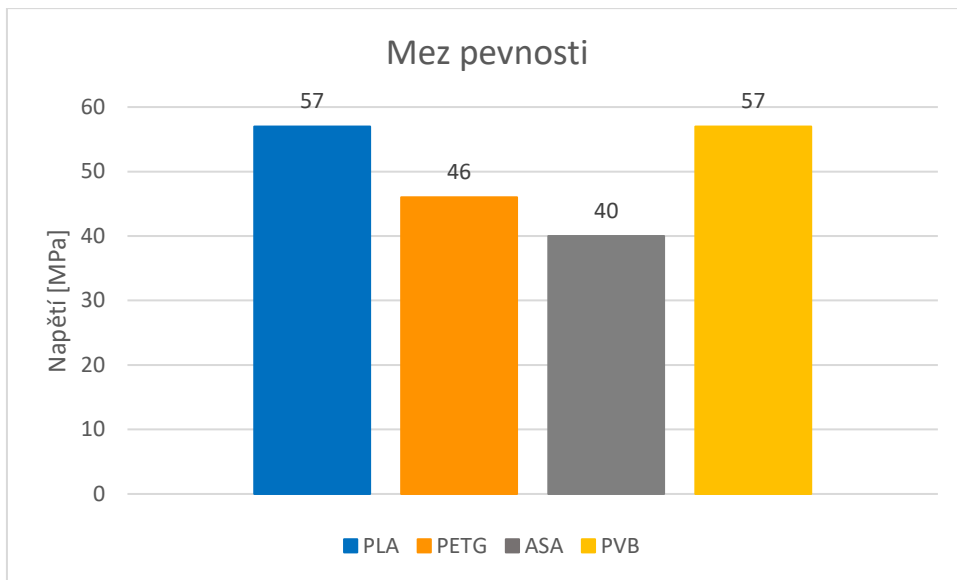
Materiál	Pevnost v tahu [MPa]		Pevnost v ohybu [MPa]		Mez pevnosti [MPa]
	Horizontální	Vertikální xz	Horizontální	Vertikální xz	
PLA	51 ± 3	59 ± 2	83 ± 6	99 ± 1	57 ± 1
PETG	47 ± 2	50 ± 1	66 ± 2	70 ± 1	46 ± 1
ASA	42 ± 1	45 ± 2	64 ± 1	69 ± 1	40 ± 1
PVB	50 ± 5	49 ± 5	72 ± 1	73 ± 3	57 ± 1



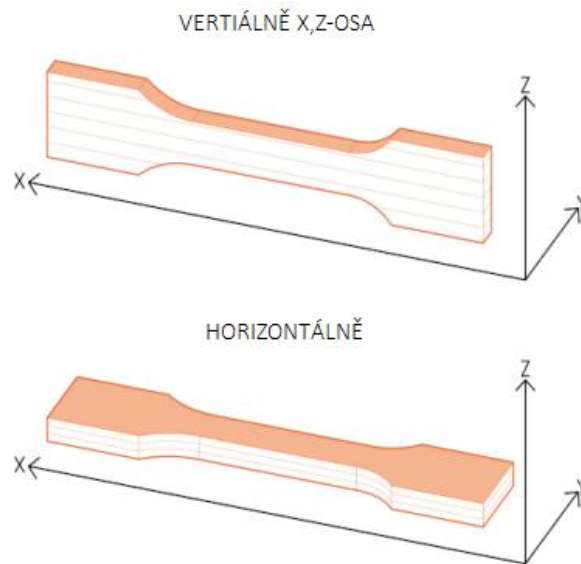
Obr. 2-13 Graf pevnostních zkoušek v tahu a ohybu



Obr. 2-14 Graf pevnostních zkoušek v tahu a ohybu



Obr. 2-15 Graf meze pevnosti



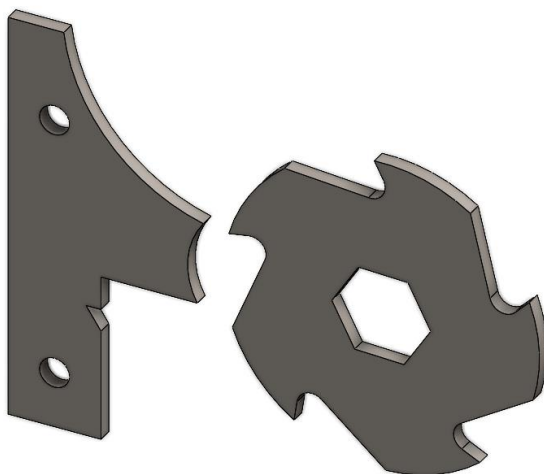
Obr. 2-16 Zobrazení směru tisku vzorku použitého při pevnostních zkouškách [17]

2.4 Výběr a rozbor součástí vhodného typu drtiče

Ve výše provedené rešerši byly popsány různé typy drtičů. Pokud chceme drtič, který bude drtit materiál na velmi jemné části tak pouze dva typy drtičů z výše uvedených se používají na jemné drcení. Jedná se o hřídelové a válcové drtiče. Protože drceným materiálem bude plast, tak válcový drtič také nebude vhodnou volbou. Přestože se válcové drtiče používají pro jemné drcení, jejich vstupní materiál musí být křehký. Problémem válcových drtičů také je, že materiál neumí efektivně stříhat, což u drcení plastu bude pravděpodobně žádoucí. Z tohoto důvodu bude nejlepší volbou hřídelový drtič, který právě mezi pevnými a rotujícími noži materiál stříhá.

2.4.1 Drtící nože

Jak už bylo výše uvedeno, nože mohou být ve formě břitových destiček, popřípadě segmentů, které jsou přidělané na držácích, nacházejících se na hřídeli. Dále se používají pevné nože viz Obr. 2-17 vlevo uložené na stěně drtiče (často u jednohřídelových drtičů) a rotující nože viz Obr. 2-17 vpravo. Rotující nože se vyrábí s jedním, dvěma nebo více břity. Jejich uspořádání bývá provedeno do šroubovice např. pomocí šestihřdeli. Vyrábí se z různých typů nástrojové oceli, přesný typ materiálu je volen vzhledem k vlastnostem drticího odpadu a požadavků jako je např. životnost nebo opotřebení.



Obr. 2-17 Nože drtiče – vlevo: stacionární nůž, vpravo: rotující nůž

2.4.2 Vložky

Hřídelové drtiče používají k oddělení nožů na hřídeli i na stěně vložky, aby se docílilo mezery mezi noži, kde se materiál stříhá. Příklady vložek jsou uvedeny na Obr. 2-18. Protože vložky nepřenášejí žádné zatížení, mohly by teoreticky být z jakéhokoliv materiálu.



Obr. 2-18 Vložky – vlevo: mezi stacionární nože, vpravo: mezi rotující nože

2.4.3 Převodovka

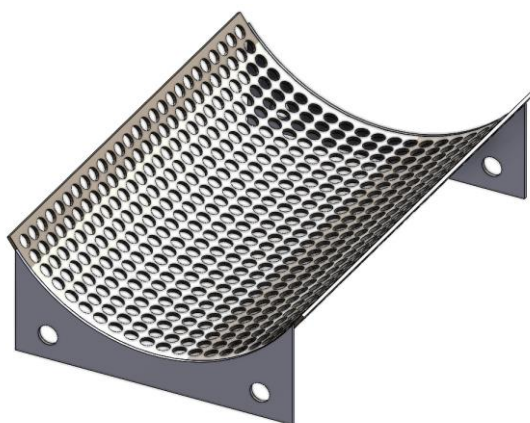
Převodovka u drtiče je využívána pro zvýšení kroutícího momentu a tím zvýšení síly, která je potřebná ke stříhu materiálu. Převodovky mohou být různého typu, nejčastěji se používají čelní nebo šnekové převodovky. U větších a dražších zařízení se používají i planetové převodovky, ale z důvodu vyšší ceny se u menších zařízení vyskytují ojediněle.

2.4.4 Pohon drtiče

Pohon drtiče je realizován pomocí elektromotorů. Průmyslové drtiče používají třífázové elektromotory, ale u menších strojů, které nepotřebují vysoký výkon najdeme i jednofázové. Jaký typ elektromotoru bude použit bude záležet na možnosti dosaženého kroutícího momentu a požadovaných výstupních otáček při daném výkonu a otáčkách elektromotoru.

2.4.5 Síto

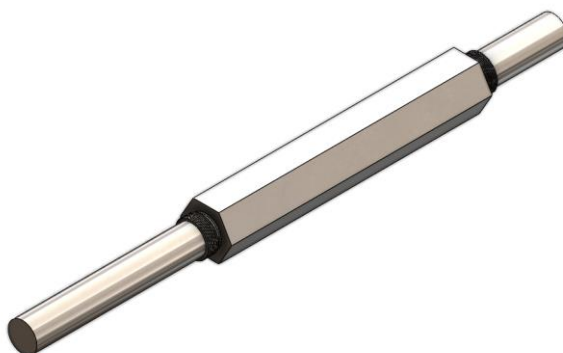
Důležitou částí drtiče je také síto viz Obr. 2-19. To je tvořeno z ohnutého děrovaného plechu. Uložení síta je řešeno např. přivařením úchytek k sítu. Pomocí úchytek je následně síto upevněno pod drticím prostorem.



Obr. 2-19 Síto

2.4.6 Hřídel

Na Obr. 2-20 můžeme vidět šestihrannou hřídel drtiče, která má na konci šestihranu závit. Závit za pomoci KM matice a vložek napomáhá k vycentrování nožů na hřídeli, ale také k pevnému uchycení, aby se nože při drcení nemohly posouvat.



Obr. 2-20 Hřídel drtiče

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Konstrukce drtiče se bude odvíjet od parametrů, které je potřeba dopředu stanovit. Především je potřeba určit, jaký druh plastu bude drtič zdrobňovat. Ve výše uvedené rešerši byla provedena pevnostní analýza nejčastěji používaných materiálů při tisku technologií FDM, a právě tyto hodnoty budou v následném návrhu konstrukce zvažovány. Při návrhu bude důležité také znát velikost výstupní frakce. Jelikož se drcený materiál bude pravděpodobně dále recyklovat například k výrobě dalšího filamentu, bylo by vhodné, aby drť nebyla větší než 10 mm z důvodu lepšího zpracování. Toho docílíme pomocí dvou způsobů. Šířkou nože a mezerou mezi noži pomocí vložek. Velikost výstupní frakce se ještě reguluje přidáním síta pod drtič. Problémem zde bude mezera mezi sítím a drticími noži, aby materiál, který nepropadne byl znovu rozdrčen a neusazoval se na sítu. Dále výpočet potřebné střížné síly a následná volba vhodného materiálu, ze kterého budou nože vyrobeny. To vede k celkovému návrhů nožů, aby stříh materiálu byl co nejefektivnější.

Důležitým konstrukčním aspektem bude rychlost otáček, protože při vyšších rychlostech a delším drcení může docházet ke zvýšení teploty nožů kvůli tření právě mezi těmito noži a drceným materiálem. To by mohlo vést k tavení plastu, který by se následně usazoval na nožích drtiče a tím snižoval účinnost a výkon drcení. Bude tedy vhodné použít převodovku, nebo motor s nižšími otáčkami, ale patřičným kroutícím momentem. Rychlost drtiče také bude mít vliv na produktivitu, tedy množství nadrceného materiálu za hodinu drcení. Tento parametr se nedá předběžně dobře určit, bude muset být změřen experimentálně.

Z důvodu bezpečnosti při používání drtiče bude lepší, aby byl drtič připevněn k rámu stolu a obsahoval násypku s ucpávkou a předešlo se nechtěnému vniknutí cizích předmětů a vyskakování materiálu při drcení. Ucpávka by mohla také sloužit k případnému potlačení materiálu do drticího prostoru.

V neposlední řadě bude potřeba vyřešit uložení nožů a vložek na hřídeli, kdy u stěny by mohlo docházet ke tření mezi otáčející se vložkou a stěnou. To by mohlo vést ke zbytečné námaze stroje jako takového a opotřebení vložky, kdy při delším používání by mohla nastat kolize mezi noži na hřídeli a pevnými noži uloženými na stěně drtiče. Spojení hřídele drtiče, motoru a převodovky by mělo obsahovat spojky např. třecí, aby se předešlo nechtěné poruše např. při zaseknutí drtiče.

3.2 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je navrhnout drtič plastového odpadu vzniklého při 3D tisku na drť vhodnou pro další využití. Drť nesmí být větší než 10 mm, aby mohla být dále využívána např. ve šnekovém extrudéru na výrobu dalšího filamentu. Celkové rozměry drtícího prostoru musí odpovídat minimálně rozměrům 200 x 200 mm, přičemž maximální rozměr konstrukce drtiče musí být do 1 x 0,75 m.

Dílčí cíle bakalářské práce

- Maximální velikost frakce 10 mm
- Drtící prostor o rozměrech minimálně 200 x 200
- Celková konstrukce do 1 x 0,75 m

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Z provedeného rozboru vyplývá, že největšími konstrukčními změnami při návrhu budou tvořit různé počty použitých hřídelů, počet břitů nožů a jejich uspořádání na hřídeli. Protože nože jsou specifickou součástí, bude jejich výsledný návrh a uspořádání vysvětlen v konstrukční části.

4.1 První varianta

První koncepční návrh je navržen bez elektromotoru a převodovky. Jedná se o ruční jednohřídelový drtič s násypkou a krytem. Z Obr. 4-1 vyplývá, že drtič je nejkompaktnější z hlediska prostoru, ale hlavní nevýhodou je zde produktivita, která kvůli použití ručního drcení nebude vysoká. Ovšem obsahuje násypku a kryt, které zároveň plní funkci bezpečnostní, protože při drcení se musí osoba nacházet přímo u drtiče. Pro lepší regulaci výstupní frakce se zde nachází síto.

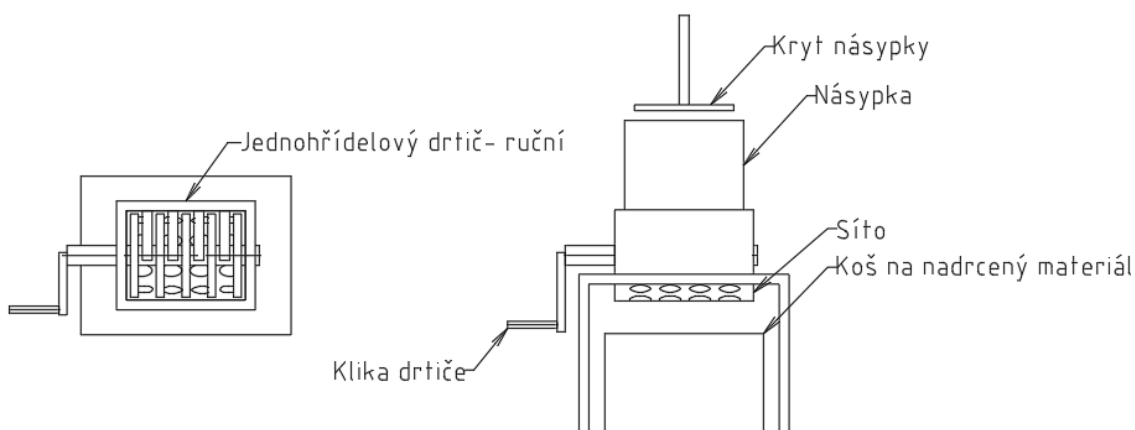
Uvedené konstrukční řešení je praktické, ale jen do určité velikosti drtiče. Při větším provedení by používání kliky pro drcení bylo velmi náročné. Osoba, která by používala drtič větších rozměrů by musela vykazovat větší fyzickou zdatnost, proto se u větších strojů používají elektromotory.

Klady

- + Malé rozměry
- + Lehký oproti sestavám s motory
- + Levný

Zápory

- Nízká produktivita
- Fyzicky náročný
- Malý drtící prostor



Obr. 4-1 Náčrt koncepčního řešení

4.2 Druhá varianta

Pro druhé koncepční řešení byl vybrán dvouhřídelový drtič s jedním elektromotorem. Volba tohoto konstrukčního řešení je velmi častá. Otáčení druhé hřídele je provedeno za pomoci ozubených kol nacházejících se na boku drtiče. Nevýhodou této koncepce je, že se zde nenachází násypka s krytem, která ale lze doplnit. Produktivita toho stroje by byla určitě vyšší než u ručního stroje, ale vkládání materiálu přímo do drtičeho prostoru je velmi nebezpečné.

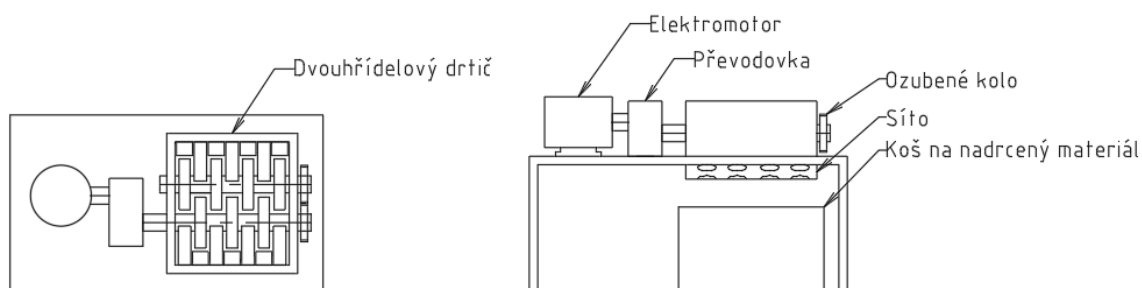
Dle Obr. 4-2 je patrné, že je zde použit elektromotor a převodovka, tudíž se jedná o pomalu běžný drtič. Dále vidíme, že se motor nachází přímo za převodovkou, jedná se tedy o čelní převodovku. Z důvodu použití elektromotoru by se u drtiče musela nacházet menší skříň s elektronikou např. pro zapnutí a vypnutí, pravděpodobně by se nacházela pod elektromotorem.

Klady

- + Produktivita
- + Cenově dostupný

Zápory

- Velké rozměry
- Hlučný motor u drtičeho prostoru
- Ochuzená pracovní plocha vedle drtiče kvůli motoru a převodovce



Obr. 4-2 Koncepční návrh drtiče

4.3 Třetí varianta

Třetí varianta je jednou z kombinací výše uvedených. Varianta představuje dvouhřídelový drtič se dvěma elektromotory, dvěma převodovkami a násypkou s krytem. Převodovky jsou pravděpodobně šnekové nebo kuželové, jak lze vidět na Obr. 4-3. Tato koncepce by byla určitě nejdražší z uvedených návrhů a největší, i když z hlediska manipulačního prostoru okolo drtiče je tato varianta mezi prvním a druhým návrhem. Je to z důvodu použití šnekových převodovek, kdy elektromotor se následně upevní pod tuto převodovku, navíc šnekové převodovky jsou levnější. Mezi další výhody patří již zmíněná násypka s krytem a také síto.

Klady

+ Produktivita

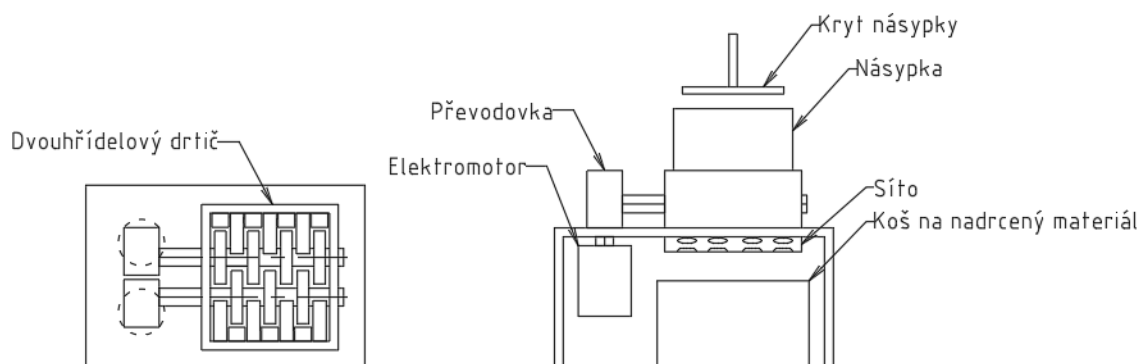
+ Kompaktní

+ Motory mimo pracovní prostor

Zápory

– Těžký

– Drahý



Obr. 4-3 Konceptní návrh drtiče

4.4 Čtvrtá varianta

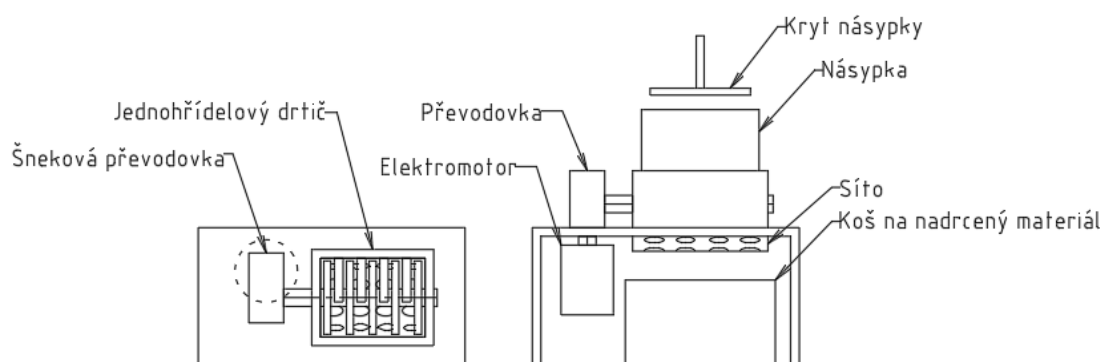
Poslední koncepční řešení je další možnou kombinací uvedených koncepčních návrhů. Oproti třetí variantě se odlišuje pouze v použití jednohřídelového drtiče, a tedy jen jednoho elektromotoru a převodovky. Dále obsahuje násypku s krytem. Hlavní předností tohoto drtiče je cena, která bude srovnatelná s druhým návrhem, celkové rozměry drtiče, ale také z důvodu použití elektromotoru i produktivita. Na Obr. 4-4 lze vidět, že je zde také použito šnekové nebo kuželové převodovky. Tato konfigurace vyniká právě tím, že je motor schovaný pod stolem drtiče a tím je omezen jeho hluk při činnosti.

Klady

- + Cenově dostupný
- + Rozměry
- + Produktivita
- + Motor mimo pracovní prostor

Zápory

- Malý drtící prostor



Obr. 4-4 Koncepční návrh drtiče

4.5 Vícekriteriální analýza

Pro zvolení nejvýhodnější koncepční varianty byla použita vícekriteriální analýza. Kritéria byla zvolena po konzultaci s vedoucím práce. Následovalo přiřazení důležitosti a váhy jednotlivých kritérií. Varianta, která získá největší sumu bodů, je označena za nejvýhodnější.

4.5.1 Kritéria rozhodování

Pro zvolení nejvýhodnější varianty bylo určeno osm kritérií k1 – k8. Kritéria jsou uvedeny na Obr. 4-5 níže.

k1	Náročnost konstrukce
k2	Náročnost výroby
k3	Cena produktu
k4	Velikost drtícího prostoru
k5	Rozměr zařízení
k6	Produktivita zařízení
k7	Hlučnost zařízení
k8	Náročnost montáže
n	8

Obr. 4-5 Tabulka rozhodovacích kritérií

4.5.2 Stupnice hodnocení jednotlivých kritérií

Hodnota jednotlivých kritérií byla zvolena vzestupně, kdy nejvyšší číslo přísluší nejvýhodnější variantě řešení.

	stupeň	známka
Hodnocení	výborné	4
	chválitebné	3
	dobré	2
	nevyhovující	1

Obr. 4-6 Tabulka hodnoty kritérií

4.5.3 Ohodnocení kritérií

Jednotlivá kritéria byla ohodnocena u každé varianty provedení drtiče odpadu na plast. Hodnota kritérií náleží hodnotě viz Obr. 4-6.

#	Kritérium	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
k1	Náročnost konstrukce	4	3	2	3
k2	Náročnost výroby	4	2	2	2
k3	Cena produktu	4	2	1	3
k4	Velikost drtícího prostoru	1	4	4	3
k5	Rozměr zařízení	3	3	3	3
k6	Produktivita zařízení	1	3	3	3
k7	Hlučnost zařízení	3	1	2	2
k8	Náročnost montáže	3	2	2	2

Obr. 4-7 Tabulka ohodnocení variant

4.5.4 Váha významnosti jednotlivých kritérií

Pomocí trojúhelníkové metody byly vyhodnoceny jednotlivé parametry vůči sobě. Na základě výpočtu voleb kritérií byla určena váha jednotlivých kritérií.

Porovnávané páry krytérií							kritérium	počet voleb	váha kritéria
k1	k1	k1	k1	k1	k1	k1	1	2	0,07
k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8			
	k2	k2	k2	k2	k2	k2	2	2	0,07
	k3	k4	k5	k6	k7	k8			
		k3	k3	k3	k3	k3	3	2	0,07
		k4	k5	k6	k7	k8			
			k4	k4	k4	k4	4	4	0,14
			k5	k6	k7	k8			
				k5	k5	k5	5	1	0,04
				k6	k7	k8			
					k6	k6	6	7	0,25
					k7	k8			
						k7	7	6	0,21
						k8			
							8	4	0,14

Obr. 4-8 Tabulka trojúhelníkové metody

4.5.5 Výsledky hodnotové analýzy

Nejvýhodnější varianta (viz Obr. 4-4) je varianta 4, která je zaznačena zeleně na Obr. 4-9. Tato varianta bude v následujících krocích řešena detailněji, jak z hlediska konstrukce, tak i ceny a dalších jiných požadavků.

#	Kritérium	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
k1	Náročnost konstrukce	0,29	0,21	0,14	0,21
k2	Náročnost výroby	0,29	0,14	0,14	0,14
k3	Cena produktu	0,29	0,14	0,07	0,21
k4	Velikost drtícího prostoru	0,14	0,57	0,57	0,43
k5	Rozměr zařízení	0,11	0,11	0,11	0,11
k6	Produktivita zařízení	0,25	0,75	0,75	0,75
k7	Hlučnost zařízení	0,64	0,21	0,43	0,43
k8	Náročnost montáže	0,43	0,29	0,29	0,29
výsledek		2,43	2,43	2,50	2,57
pořadí		3	3	2	1

Obr. 4-9 Tabulka vyhodnocených variant

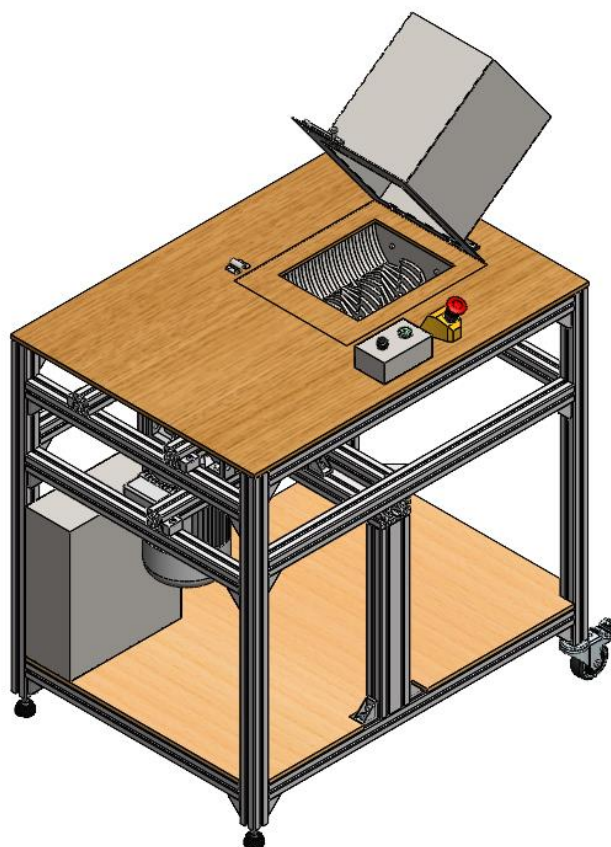
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Dle provedené vícekriteriální analýzy byla vyhodnocena čtvrtá varianta jako nejvýhodnější. Tato varianta se skládá z následujících komponentů:

- elektromotor
- šneková převodovka
- jednohřídelový drtič
- rotující a stacionární nože
- síto
- násypka
- rám
- rozvaděč
- kontrolní panel
- bezpečnostní tlačítko

Výhodou použití elektromotoru je produktivita, která bude určitě vyšší než u ručního drtiče, ale také usnadnění práce, aby ji nemusela vykonávat patřičná osoba. Šneková převodovka vyniká právě použitím mimoběžných hřídelí a jejím použitím můžeme elektromotor schovat např. pod stůl a uvolnit tak prostor vedle drtiče. Přesný typ elektromotoru a šnekové převodovky bude uveden níže.

Omezením pouze na jednu hřídel bude drtič patřičně levnější, kompaktnější, ale zároveň dostačující pro splnění požadovaných cílů práce. Použitím dvouhřídelového drtiče by se zdvojnásobil počet pracujících součástí, jako jsou nože na hřídeli nebo ložiska, a tedy i jeho cena. Také by se musel vyřešit pohyb druhé hřídele např. pomocí ozubených kol.

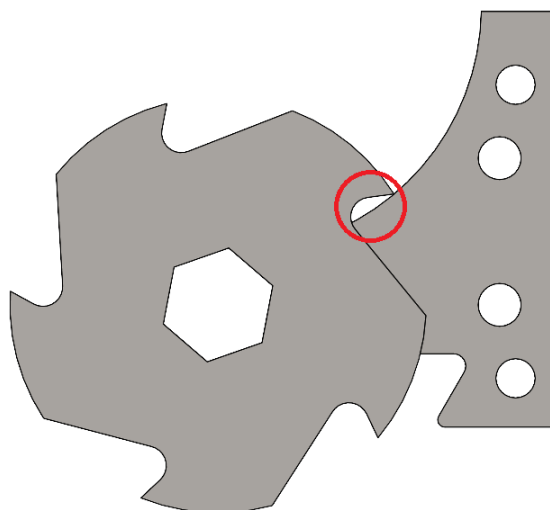


Obr. 5-1 Drtič plastu

5.1 Výpočet střížných podmínek

Přesné stanovení průběhů sil působících při drcení je velmi obtížné, protože drcený materiál se při drcení může libovolně natáčet. Výpočet sil a momentů v průběhu drcení je založen spíše na odhadu, významnou část při návrzích drtiče mají experimentální zkoušky. Proto bude proveden teoretický výpočet střížné síly, podle kterého bude následně zvolena pohonná jednotka drtiče.

Pro zjištění, jak výkonný motor bude drtič potřebovat, bude muset být proveden výpočet maximální střížné síly pro nejhorší možnou volbu drcení. Ta nastane, když drtič začne produkovat svou největší možnou výstupní frakci a při záběru všech nožů nacházejících se právě v místě drcení viz Obr. 5-2 označená část červeným kroužkem. Tedy těch které jsou zrovna schopny produkovat odpad. Výsledný konstrukční návrh obsahuje na hřídeli 14 nožů umístěných do šroubovice a v místě drcení se nachází maximálně tři nože (např. první, sedmý a třináctý nůž), přičemž tento jev nastává pouze ve dvou variantách, jinak drtič pracuje v záběru dvou nožů. Koeficient přepočtu síly, který bude při výpočtu použit je $k_{nože} = 3$. Poloměr těchto nožů je $r = 85$ mm.



Obr. 5-2 Maximální velikost frakce v záběru nože

Ze základního výpočtu napětí $\tau_s = \frac{F}{S}$ vyjádříme sílu F a dostaneme vztah (3), následný výpočet střížné síly byl proveden dle [15]:

$$F = \tau_s \cdot S = 0,77 \cdot R_m \cdot S \quad (3)$$

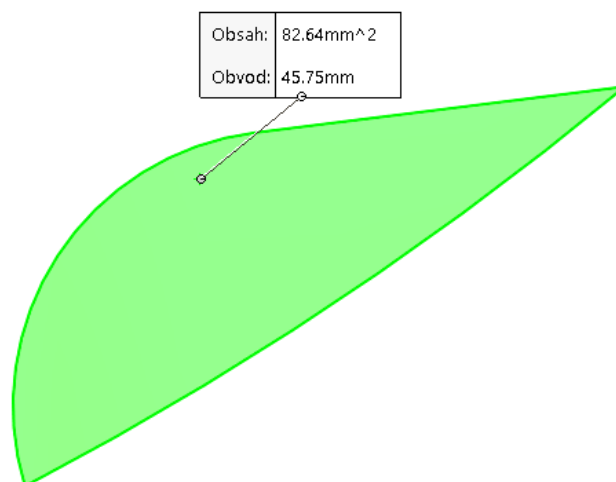
kde: F – střížná síla [N]

τ_s – střížné napětí [MPa]

S – plocha průřezu ve střížné rovině [mm²]

R_m – mez pevnosti drceného materiálu [MPa]

Mez pevnosti drceného materiálu vychází z Tab. 2-5, kdy maximální mez pevnosti vykazuje PLA a PVB, tedy $R_{mP} = 57$ [MPa]. Střížná plocha zde nelze přímo určit, protože tloušťka vstupního materiálu není konstantní. Proto je zavedena plocha teoretické výplně viz Obr. 5-3 mezi rotujícími noži a stacionárními noži, která bude při výpočtech použita.



Obr. 5-3 Plocha teoretické výplně

Střížná plocha se nachází i na druhé straně nože, tudíž výsledná plocha se musí pře násobit dvěma:

$$S_1 = S \cdot 2 = 82,64 \cdot 2 = 165,3 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

Protože břity nože mají tvar ostré geometrie, úhel břitu nože je menší než 90° , břit nože vniká do materiálu postupně nikoliv naráz, proto se násobí střížná plocha koeficientem $k_1 = 0,1$.

$$S_{k1} = S_1 \cdot k_1 = 83 \cdot 0,1 = 16,53 \text{ mm}^2 \quad (5)$$

Pro výpočet síly, která působí na jeden břit je dosazeno do vztahu (3):

$$F = 0,77 \cdot 57 \cdot 16,53 = 725,5 \text{ N}$$

Výpočet maximální kritické síly při drcení pro nejhorší možný případ je:

$$F_{krit} = F \cdot k_{nože} = 725,5 \cdot 3 = 2176,5 \text{ N} \quad (6)$$

Pomocí kritické síly a poloměru nože, zjistíme potřebný moment na hřídeli:

$$M_{krit} = F_{krit} \cdot r = 2176,5 \cdot 0,085 = 185 \text{ N m} \quad (7)$$

Abychom zjistili výstupní otáčky a převodový poměr převodovky, budeme potřebovat znát výkon a otáčky motoru. Pro ukázkový výpočet použijeme motor s výkonem $P_{mot} = 0,75$ kW o otáčkách $n_{mot} = 1390$ ot/min a dostaneme:

$$P_{mot} = M_{krit} \cdot \omega_{krit} \text{ [W]} \quad (8)$$

kde ω_{krit} je kritická úhlová rychlost, která lze vypočítat následovně.

$$\omega_{krit} = 2 \cdot \pi \cdot n_{krit} [s^{-1}] \quad (9)$$

Pomocí vztahu (7) a (8) vyjádříme kritické otáčky n_{krit} .

$$n_{krit} = \frac{P_{mot} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot M_{krit}} = \frac{750 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 185} \doteq 38,71 \text{ ot/min} \quad (10)$$

Teoretický převodový poměr následně zjistíme podílem otáček motoru vůči kritickým otáčkám. Se zvyšujícím se převodovým poměrem roste i kroutící moment, ale klesají otáčky. Převodový poměr pro motor o výkonu 0,75 kW je:

$$i_{krit} = \frac{n_{mot}}{n_{krit}} = \frac{1390}{38,71} \doteq 36 \quad (11)$$

Teoretický převodový poměr je to proto, že nezahrnuje účinnost šnekového převodu. Výpočet, který zahrnuje účinnost a volba pohonné jednotky je uvedena níže.

5.2 Volba pohonu drtiče

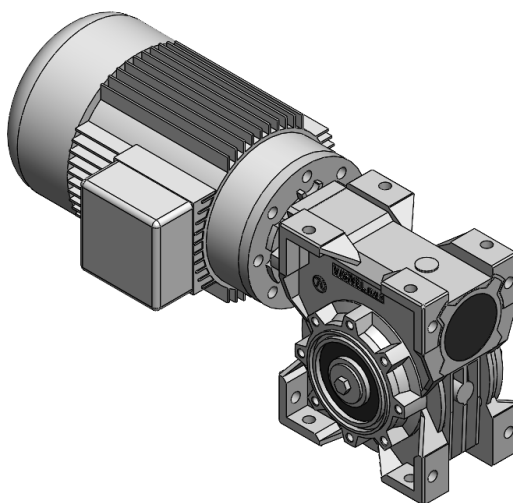
Dle výše provedeného výpočtu byl zvolen pohon drtiče, který se skládá z elektromotoru a šnekové převodovky dodávaný v celku viz Obr. 5-4. Celá sestava je doplněna plnou hřídelí o průměru 30 mm, která je vložena a zajištěna v převodovce. Z důvodu bezpečnosti, kdy může nastat nejhorší možná forma drcení, a to při záběru všech tří nožů s maximální velikostí frakce, nebo při vhození materiálu na který nebyl drtič zkonstruován, byl zvolen výkonnější elektromotor. Elektromotor o výkonu $P_{motor} = 1,1 \text{ kW}$ a otáčkách $n_{motor} = 1400 \text{ ot/min}$. Typové označení pohonného ústrojí od firmy VARVEL je RT M RT 70 40 90 B14-G AS 30x60 LH none ASC MT 1,1 kW 90 S4 B14 X2 viz **příloha 1** [16].

Převodový poměr nemůže být vypočten pomocí vztahu (10), ale výpočet musí být doplněn o účinnost šnekového převodu. Šnekové převodovky sice vynikají v realizovatelnosti vysokých převodových poměrů, ale jejich nevýhodou je nižší účinnost ($\eta = 45 - 90 \%$), která klesá s rostoucím převodovým číslem. To vede ke ztrátě výstupního výkonu, protože jeho část je převedena v teplo. Výsledný převodový poměr zahrnující účinnost je vypočten dle vztahu (11), kdy účinnost zvolené převodovky $\eta = 0,71$.

$$i_{pohon} = \frac{n_{motor}}{n_{pkrit} \cdot \eta} = \frac{1400}{61,79 \cdot 0,71} \doteq 31,91 \quad (12)$$

I zde byl zvolen z důvodu bezpečnosti větší převodový poměr a to $i = 40$. Výstupní otáčky pohonu se zvoleným převodovým číslem 40 jsou $n_{výstup} = 35 \text{ ot/min}$. Výstupní kroutící moment zjištěný z katalogu firmy VARVEL pro zvolenou pohonnou jednotku je $M_k = 213 \text{ Nm}$.

Uchycení pohonné jednotky je vysvětleno v kapitole 5.6.



Obr. 5-4 Pohon drtiče [16]

5.3 Spojení pohonu a hřídele drtiče

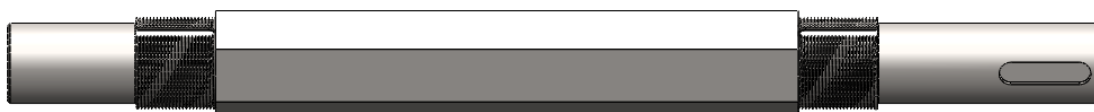
Jako spojka hřídele drtiče a pohonné jednotky byla zvolena pružná litinová spojka. Pružné spojky zajišťují přenos kroutícího momentu pomocí pera a tlumí vibrace. Slouží k vyrovnání úhlové odchylky mezi spojovanými hřídeli a také k vyrovnání drobné nesouososti [17]. Tyto spojky vyrábí např. firma T.E.A. TECHNIK s.r.o. a byl vybrán typ spojky s označením A38/45 A/A 30 30. Dle katalogového listu je pružný člen schopen přenášet nominální kroutící moment $M_{knom} = 190 \text{ N m}$ a maximální $M_{kmax} = 380 \text{ N m}$.



Obr. 5-5 Pružná spojka [17]

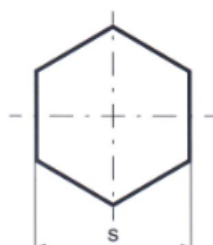
5.4 Hřídel drtiče

Hřídel drtiče viz Obr. 5-6 je vyrobena z materiálu C45, kdy mez pevnosti $R_{mH} = 560$ MPa a mez kluzu $R_{eH} = 275$ MPa. Polotovár je šestihránná tyč viz Obr. 5-7, která je následně upravena soustružením a frézováním. Hřídel je ze šestihranu upravena na kruhovou tyč ve dvou různých průměrech, kdy na větším průměru, který se nachází hned za šestihranem, je vyřezán závit pro KM8 matici a následně vyfrézována drážka pro MB8 podložku. Na druhém průměru o velikosti 35 mm jsou navlečena ložiska a vyfrézovány dvě drážky pro pera, která přenáší kroutící moment na hřídel. Použití KM matice a MB podložky při montáži plní funkci upevnění rotujících nožů s vložkami na hřídel viz Obr. 5-15.



Obr. 5-6 Hřídel drtiče

Tyč šestihránná tažená za studena, EN 10278, úchylka h11
// **rozměr 41**



Norma:	ČSN EN 10278	
Rozměr šestihranu	s	41 mm
Plocha průřezu		1456 mm ²
Hmotnost		11,43 kg/m
Mezní úchylka h11		0 mm -0,160 mm
Povrch		tažený

Obr. 5-7 Detail polotovaru od firmy Feron [18]

Uložení je provedeno rotačně pomocí dvou ložiskových jednotek s typovým označením SKF UCFL 207, volba ložiskové jednotky je uvedena níže viz kapitola 5.4.4. Hřídel je namáhána na ohyb a krut, kdy výsledné vnitřní účinky jsou zobrazeny na Obr. 5-9 a jejich výpočet je proveden níže v kapitole 5.4.2.

5.4.1 Kontrola pera na otláčení

Protože je kroutící moment přenášen pomocí pera, je potřeba provést kontrolu na otláčení. Vstupními hodnotami jsou přenášený kroutící moment $M_k = 213 \text{ N m}$, průměr hřídele $d = 35 \text{ mm}$ a rozměry pera $l = 40 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ mm}$, $t_1 = 3,3 \text{ mm}$. Dále bude pro výpočet potřeba určit dovolený tlak na bok drážky, který zjistíme pomocí vztahu (13), kdy p_0 zjistíme z tabulky viz Tab. 5-1. Výpočty byly provedeny dle [19].

Tab. 5-1 Hodnoty dovoleného tlaku dle materiálu a zatížení pro druhy spojů [19]

základní hodnota tlaku p_0 (MPa) pro náboj z materiálu						
ocel, ocel na odlitky	šedá litina	temperovaná litina	bronz, mosaz	slitina AlCuMg, vytvrzená	slitina AlMg, AlMn, AlMgSi, vytvrzená	slévárenská slitina AlSiMg
150*	90	110	50	100	90	70

* Pro tvrzené boky drážek je $p_0 = 200 \text{ MPa}$.

dovolený tlak na bocích drážek v náboji p_D		
zatížení	drážkové klíny a polygonové spoje	těsná pera a drážkové spoje
jednosměrné, klidné	$1,1p_0$	$0,8p_0$
jednosměrné, malé rázy	$1,0p_0$	$0,7p_0$
jednosměrné, velké rázy	$0,75p_0$	$0,6p_0$
střídavé, malé rázy	$0,6p_0$	$0,45p_0$
střídavé, velké rázy	$0,45p_0$	$0,25p_0$

Výpočet dovoleného tlaku dle Tab. 5-1:

$$p_d = 0,7 \cdot p_0 = 0,7 \cdot 90 = 63 \text{ MPa} \quad (13)$$

Určení obvodové síly zjistíme pomocí vztahu (14):

$$F_o = \frac{2 \cdot M_k}{d} = \frac{2 \cdot 213}{0,035} = 12171,43 \text{ N} \quad (14)$$

Výpočet tlaku na bok drážky podle vztahu (15)

$$p = \frac{F_o}{t_1 \cdot (l-b)} = \frac{12171,43}{3,3 \cdot (40-10)} = 122,94 \text{ MPa} \quad (15)$$

Kontrola na otláčení je provedena ze vztahu (16)

$$p \leq p_D \quad (16)$$

Dle kontroly je jasné, že jedno pero nebude schopno přenést maximální kroutící moment. Proto zavedeme koeficient $k_p = 2$, který označuje počet ploch, které přenášejí kroutící moment. Aby počet funkčních ploch narostl, musí být hřídel osazena dalším perem. Výsledný návrh tedy obsahuje dvě pera.

Po dosazení koeficientu do rovnice (15) bude hodnota tlaku rovna:

$$p = \frac{F_o}{t_1 \cdot (l-b) \cdot k_p} = \frac{12171,43}{3,3 \cdot (40-10) \cdot 2} = 61,47 \text{ MPa}$$

Ze vztahu (16) je patrné, že po použití druhého pera je kontrola na otláčení splněna.

5.4.2 Výsledné vnitřní účinky na hřídeli

Na hřídeli se nachází 2 možnosti, při kterých zabírají 3 nože. Proto bude proveden výpočet dvou variant výsledných vnitřních účinků, aby byl vypočten maximální ohybový moment. V první variantě se jedná o první, šestý a třináctý nůž a pro druhou variantu jsou to nože posunuté o jeden vlevo, tedy druhý, sedmý a čtrnáctý nůž. Síly jsou na každém břitu stejné pro neobsahují indexy ($F = 725,5 \text{ N}$). Na Obr. 5-8 jsou uvedeny rozměry jednotlivých variant.

Výpočet první varianty

$$\sum F_y = 0 : F_{B1} - 3F + F_{A1} = 0 \Rightarrow F_{B1} = 3F - F_{A1} \quad (17)$$

$$\sum M_o^B = 0 : F_{A1} \cdot 358 - F \cdot 296 - F \cdot 188 - F \cdot 80 = 0 \quad (18)$$

$$F_{A1} = \frac{F \cdot 564}{358} = \frac{725,5 \cdot 564}{358} = 1142,97 \text{ N} \quad (19)$$

$$F_{B1} = 2176,5 - 1142,97 = 1033,53 \text{ N}$$

Maximální ohybový moment se nachází v místě působení prostřední síly F viz Obr. 5-9 a jeho hodnota je vypočítána pomocí vztahu (20)

$$M_{omax} = F_A \cdot (0,062 + 0,108) - F \cdot 0,108 = 115,95 \text{ N m} \quad (20)$$

Výpočet druhé varianty

Výpočet bude proveden stejně dle výše uvedených rovnic (17) – (20)

$$\sum F_y = 0 : F_{B2} - 3F + F_{A2} = 0 \Rightarrow F_{B2} = 3F - F_{A2}$$

$$\sum M_o^B = 0 : F_{A2} \cdot 358 - F \cdot 278 - F \cdot 170 - F \cdot 62 = 0$$

$$F_{A2} = \frac{F \cdot 510}{358} = \frac{725,5 \cdot 510}{358} = 1033,53 \text{ N}$$

$$F_{B2} = 2176,5 - 1033,53 = 1142,97 \text{ N}$$

$$M_{omax} = F_{A2} \cdot (0,080 + 0,108) - F \cdot 0,108 = 115,95 \text{ N m}$$

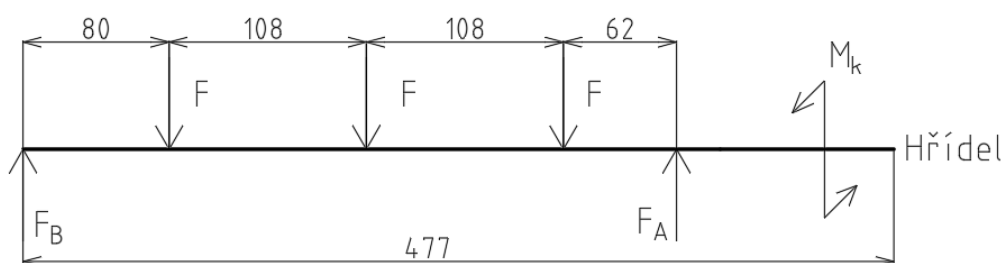
Kroutící moment tvořený noži na hřídeli označený M_{k1} vypočítaný ze vztahu (6)

$$M_{k1} = F \cdot r = 725,5 \cdot 0,085 = 61,67 \text{ N m}$$

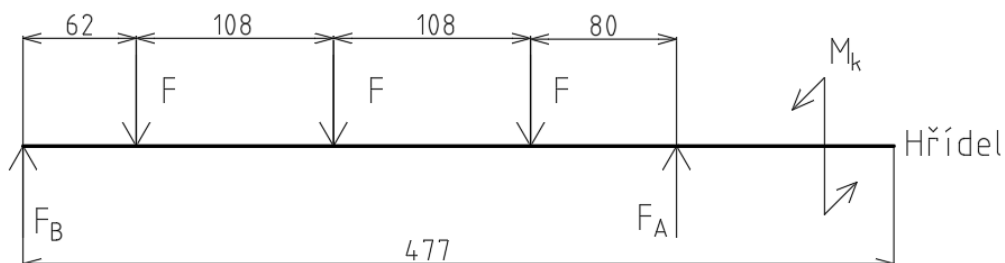
Výpočet minimálního průměru hřídele dle teorie HMH pro bezpečnost $k_k = 2$ podle vztahu (21)

$$d_{min} = \sqrt[6]{\frac{k_k^2 \cdot ((32 \cdot M_{omax})^2 + 4 \cdot ((16 \cdot M_k)^2))}{(\pi \cdot R_e)^2}} = \sqrt[6]{\frac{4 \cdot ((32 \cdot 115,95)^2 + 4 \cdot ((16 \cdot 213)^2))}{(\pi \cdot 275 \cdot 10^6)^2}} = 26,19 \text{ mm} \quad (21)$$

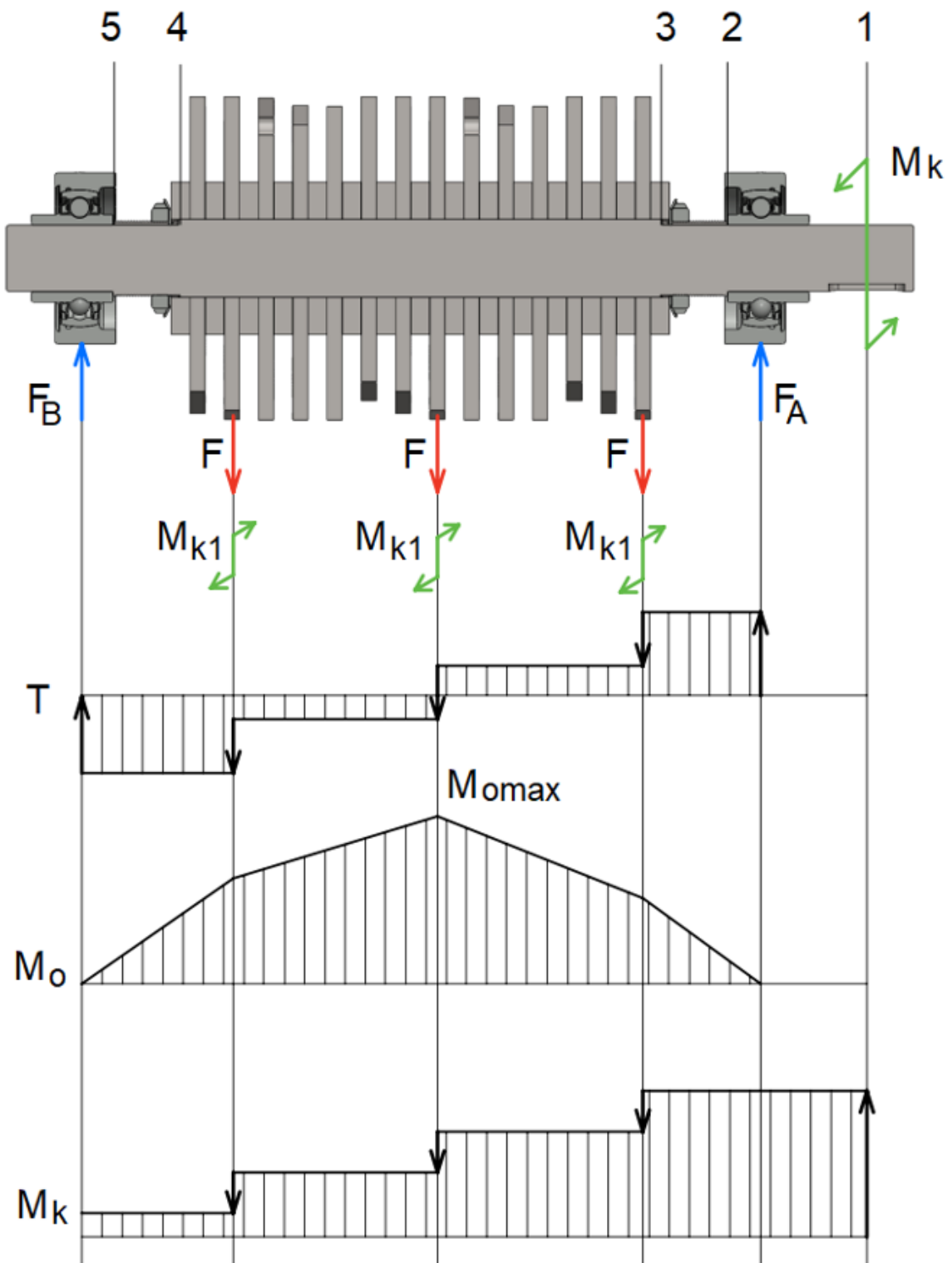
Rozměry první varianty



Rozměry druhé varianty



Obr. 5-8 Doplnující obrázek rozměrů působících sil na hřídeli



Obr. 5-9 Výsledné vnitřní účinky na hřídeli

5.4.3 Výběr nebezpečných míst a výpočet bezpečnosti

Nebezpečná místa jsou označena čísly na Obr. 5-9.

Vstupní parametry vystupující ve výpočtech níže, které byly provedeny dle [19]:

- poloměr osazení u ložisek $r_o = 0,5$ mm
- poloměr osazení zápichu u šestihranu $r_{oz} = 0,8$ mm
- poloměr zaoblení v drážce pera $r_{pero} = 0,6$ mm
- průměr hřídele pod ložiskem A a B $d = 35$ mm
- průměr hřídele v místě zápichu $d_{zápich} = 39,4$ mm
- minimální průměr závitu M40x1,5 pro třídu přesnosti 6g $d_{zmin} = 37,92$ mm
- vepsaný průměr šestihranu $D_{\xi} = 41$ mm
- mez kluzu $R_{eH} = 275$ MPa
- kroutící moment $M_k = 213$ Nm
- síla ve vazbě A $F_{A1} = F_{B2} = 1142,96$ N
- vzdálenost osazení ložiska od síly F_A $x_{oA} = 17,5$ mm
- vzdálenost osazení u šestihranu od síly F_A $x_{o\xi} = 51$ mm

První místo – drážka pro pero

Výpočet průměru hřídele pod perem:

$$d_1 = d - t = 35 - 4,7 = 30,3 \text{ mm} \quad (22)$$

Vstupní parametry do nomogramů jsou vypočteny dle vztahu (23) a (24)

$$\frac{r_{pero}}{d_1} = \frac{0,6}{30,3} = 0,0198 \quad (23)$$

$$\frac{d}{d_1} = \frac{35}{30,3} = 1,1429 \quad (24)$$

Součinitel tvaru pro ohyb lze zanedbat, protože se v místě pera nenachází ohyb ale pouze krut. Součinitel tvaru pro krut byl zvolen pomocí nomogramu: $\alpha_{\tau 1} = 1,85$.

Ohybový moment v místě osazení:

$$M_{o1} = 0 \text{ N m} \quad (25)$$

Výpočet nominálního ohybového a smykového napětí:

$$\sigma_{nom1} = \frac{32 \cdot M_{oA}}{\pi \cdot d_1^3} = \frac{32 \cdot 0}{\pi \cdot 0,0303^3} = 0 \text{ MPa} \quad (26)$$

$$\tau_{knom1} = \frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot d_1^3} = \frac{16 \cdot 213}{\pi \cdot 0,0303^3} = 39 \text{ MPa} \quad (27)$$

Redukované napětí dle teorie HMM je vypočteno pomocí vztahu (28)

$$\sigma_{red1} = \sqrt{(\alpha_{\sigma 1} \cdot \sigma_{nom1})^2 + 3 \cdot (\alpha_{\tau 1} \cdot \tau_{knom1})^2} = 124,95 \text{ MPa} \quad (28)$$

Bezpečnost k meznímu stavu pružnosti:

$$k_{k1} = \frac{R_{eH}}{\sigma_{red1}} = 2,2 \quad (29)$$

Druhé místo – osazení ložiska A

Vstupní parametry do nomogramů jsou vypočteny dle vztahu (30) a (31)

$$\frac{r_o}{d_A} = \frac{0,5}{35} = 0,0143 \quad (30)$$

$$\frac{d_{zmin}}{d_A} = \frac{37,92}{35} = 1,0834 \quad (31)$$

Součinitel tvaru pro ohyb: $\alpha_{\sigma2} = 2,55$ a pro krut: $\alpha_{\tau2} = 1,75$ byly zvoleny pomocí nomogramů.

Výpočet ohybového momentu v místě osazení dle vztahu (32)

$$M_{o2} = F_{A1} \cdot x_{oA} = 20 \text{ N m} \quad (32)$$

Výpočet nominálního ohybového a smykového napětí:

$$\sigma_{nom2} = \frac{32 \cdot M_{o2}}{\pi \cdot d_A^3} = \frac{32 \cdot 20}{\pi \cdot 0,035^3} = 4,75 \text{ MPa} \quad (33)$$

$$\tau_{knom2} = \frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot d_A^3} = \frac{16 \cdot 213}{\pi \cdot 0,035^3} = 25,30 \text{ MPa} \quad (34)$$

Redukované napětí dle teorie HMH je vypočteno pomocí vztahu (35)

$$\sigma_{red2} = \sqrt{(\alpha_{\sigma2} \cdot \sigma_{nom2})^2 + 3 \cdot (\alpha_{\tau2} \cdot \tau_{knom2})^2} = 77,64 \text{ MPa} \quad (35)$$

Bezpečnost k meznímu stavu pružnosti:

$$k_{k2} = \frac{R_{eH}}{\sigma_{red2}} = 3,54 \quad (36)$$

Třetí místo – zápich u šestihranu

Vstupní parametry do nomogramů jsou vypočteny dle vztahu (37) a (38)

$$\frac{r_{oz}}{d_{zápich}} = \frac{0,8}{39,4} = 0,0203 \quad (37)$$

$$\frac{D_{\S}}{d_{zápich}} = \frac{41}{39,4} = 1,0406 \quad (38)$$

Součinitel tvaru pro ohyb: $\alpha_{\sigma3} = 2,22$ a pro krut: $\alpha_{\tau3} = 1,58$ byly zvoleny pomocí nomogramů.

Výpočet ohybového momentu v místě osazení dle vztahu (39)

$$M_{o3} = F_{A1} \cdot x_{o\S} = 58,29 \text{ N m} \quad (39)$$

Výpočet nominálního ohybového a smykového napětí:

$$\sigma_{nom3} = \frac{32 \cdot M_{o3}}{\pi \cdot d_{zápich}^3} = \frac{32 \cdot 58,29}{\pi \cdot 0,0394^3} = 9,70 \text{ MPa} \quad (40)$$

$$\tau_{knom3} = \frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot d_{zápich}^3} = \frac{16 \cdot 213}{\pi \cdot 0,0394^3} = 17,73 \text{ MPa} \quad (41)$$

Redukované napětí dle teorie HMM je vypočteno pomocí vztahu (42)

$$\sigma_{red3} = \sqrt{(\alpha_{\sigma3} \cdot \sigma_{nom3})^2 + 3 \cdot (\alpha_{\tau3} \cdot \tau_{knom3})^2} = 53,10 \text{ MPa} \quad (42)$$

Bezpečnost k meznímu stavu pružnosti:

$$k_{k3} = \frac{R_{eH}}{\sigma_{redA}} = 5,17 \quad (43)$$

Čtvrté místo – zápich u šestihranu

Pokud bude pro výpočet bezpečnosti v osazení u šestihranu použita síla F_{B2} z výpočtu druhé varianty VVU, bude bezpečnost k MSP stejná jako pro osazení šestihranu ve třetím nebezpečném místě. Vyplývá to ze symetrie, která nastává mezi vazbami A a B viz Obr. 5-8. Tedy $k_{k4} = k_{k3} = 5,17$.

Páté místo – osazení ložiska B

Bezpečnost osazení ložiska B bude taktéž stejná jako v osazení ložiska A, pokud bude pro výpočet bezpečnosti použita síla F_{B2} z výpočtu druhé varianty VVU. Vyplývá to ze symetrie, která nastává mezi vazbami A a B viz Obr. 5-8. Tedy $k_{k5} = k_{k2} = 3,54$.

Nejnebezpečnější místo se nachází v drážce pro pero, kdy bezpečnost $k_{k1} = 2,2$.

5.4.4 Volba ložisek

Ložiska v ložiskových jednotkách A a B jsou namáhána silami F_A a F_B viz Obr. 5-9. Největších hodnot dosahují síly $F_{A1} = F_{B2} = 1142,97 \text{ N}$, proto tato hodnota bude použita ve výpočtu minimální hodnoty základní dynamické únosnosti. Ze základní trvanlivosti ložiska se stanoví požadovaná dynamická únosnost, kdy základní trvanlivost ložiska $L = 25\,000 \text{ h}$. Výpočty jsou provedeny dle [19].

$$L = \left(\frac{C}{F_{A1}}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_{motor} \cdot 60} \Rightarrow \quad (44)$$

$$\Rightarrow C_v = F_{A1} \cdot \left(\frac{n_{výstup} \cdot L \cdot 60}{10^6}\right)^{\frac{1}{3}} = 1142,97 \cdot \left(\frac{35 \cdot 25\,000 \cdot 60}{10^6}\right)^{\frac{1}{3}} = 16\,754,76 \text{ N} \quad (45)$$

Ze základní dynamické únosnosti byla zvolena ložisková jednotka UCFL 207, která obsahuje kuličkové ložisko UC 207 s dynamickou únosností $C = 25,5 \text{ kN}$ [20]. Trvanlivost ložiska se zjistí zpětným dosazením do vztahu (44).

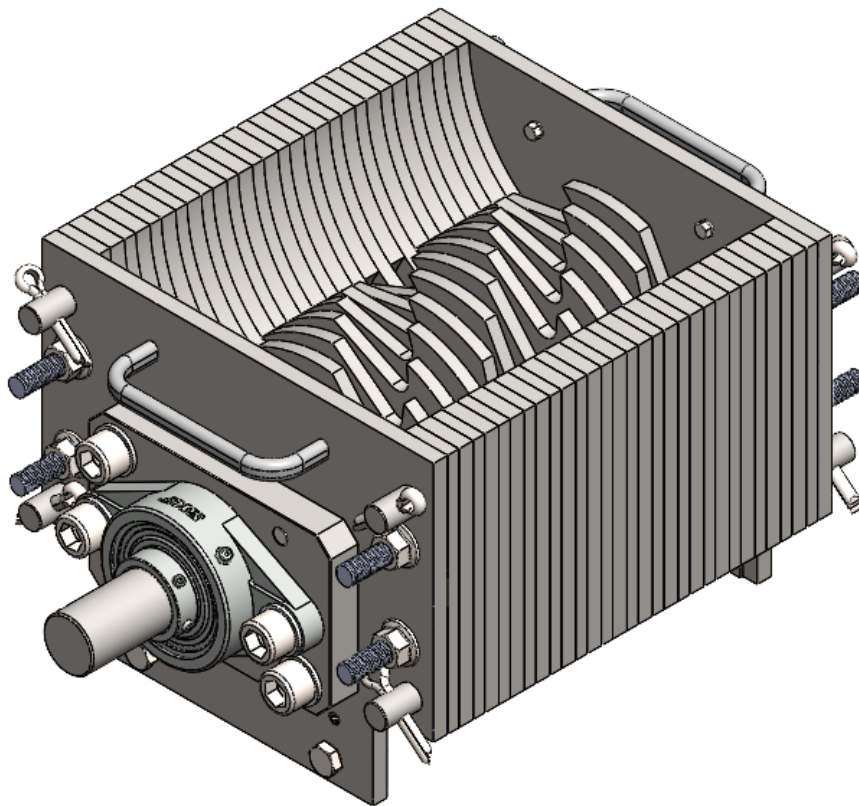
$$L = \left(\frac{C}{F_{A1}}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_{motor} \cdot 60} = \left(\frac{25500}{1142,97}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{35 \cdot 60} = 88\,134,41 \text{ h} \quad (46)$$



Obr. 5-10 Ložisková jednotka SKF UCFL 207 [20]

5.5 Sestava drtiče

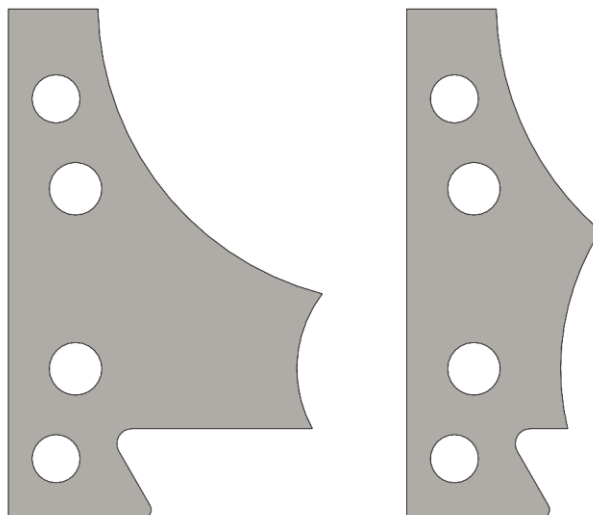
Sestava drtiče viz Obr. 5-11 je tvořena hlavně rotujícími noži, stacionárními noži a dvěma předními stěnami. Rotující nože jsou upevněny na hřídeli, která je uložena v ložiskových domcích a ty jsou upevněny na kompenzačních deskách. Vše je smontováno pomocí normalizovaných součástí. Celá sestava je následně doplněna o kovová madla, aby byla možná sestavu přemístit. Podrobné rozdělení sestavy je uvedeno v podkapitolách níže.



Obr. 5-11 Sestava drtiče

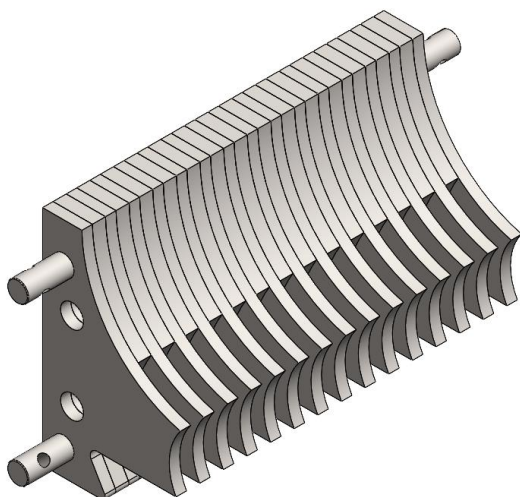
5.5.1 Střižnice

Jedná se o sestavu stacionárních nožů a vložek viz Obr. 5-12, kdy vlevo je nůž a vpravo vložka. Nůž a vložka jsou vyrobeny z konstrukční oceli S235JR, polotovarem je plech válcovaný za tepla dle EN 10051. Nůž je vyroben z plechu o tloušťce 8 mm, stejně tak jako rotující nože, které jsou ze stejného materiálu. Vložka je vyrobena o tloušťce plechu 10 mm právě proto, aby nastala mezera mezi břity rotujícího nože a stacionárního.



Obr. 5-12 Pevný nůž a vložka

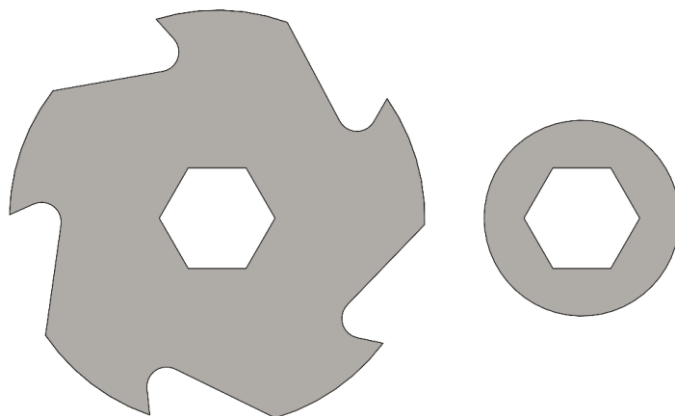
Sestava drtiče obsahuje dvě sestavy střižnic, jedna sestava střižnice je na Obr. 5-13. Tato sestava je složena z 15 stacionárních nožů a 14 vložek, které jsou nasunuty na vodící tyče viz Obr. 5-13. Mezi tyto dvě sestavy je následně vložena sestava rotujících nožů, která je popsána níže. Zbylé dvě díry nacházející se blíže ke středu součástí následně pomocí závitových tyčí a matic uchycují přední stěny k sestavám střižnic.



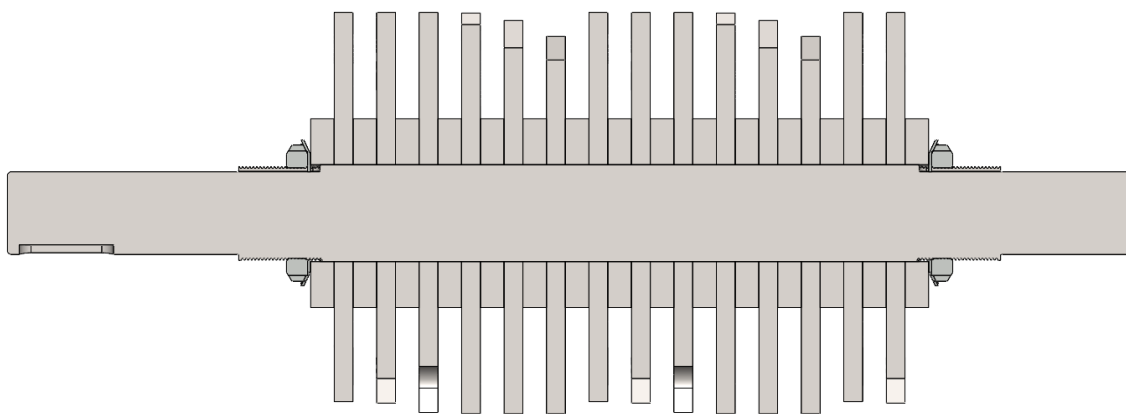
Obr. 5-13 Sestava střižnice

5.5.2 Umístění rotujících nožů na hřídeli

Podobně jako u sestavy střížnice, i zde se nachází nůž a vložka viz Obr. 5-14. Sestava 14 rotujících nožů a 15 vložek je pomocí KM matic a MB podložek upevněna na šestihránné hřídeli viz Obr. 5-15. Rotující nůž a vložka jsou vyrobeny ze stejného materiálu jako stacionární nůž a vložka stacionárního nože. Rotující nože jsou vyrobeny z plechu o tloušťce 8 mm a vložky o tloušťce plechu 10 mm.



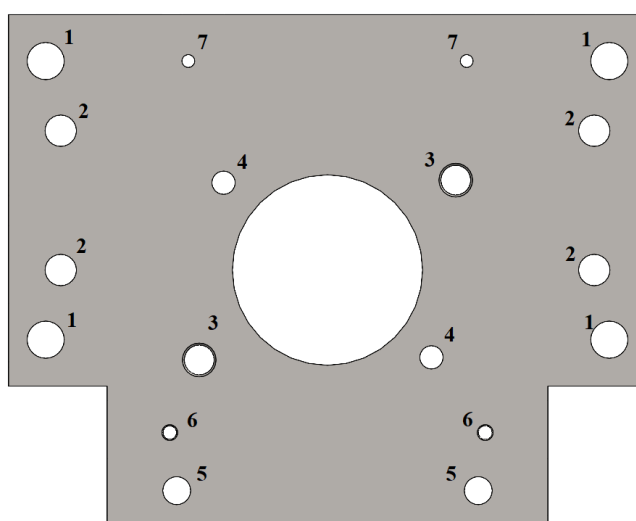
Obr. 5-14 Rotující nůž a vložka



Obr. 5-15 Řez sestavy rotujících nožů na hřídeli

5.5.3 Přední stěna

Přední stěna viz Obr. 5-16 je tvořena z konstrukční oceli S235JR a jejím polotovarem je plech válcovaný za tepla dle EN 10051 o tloušťce 10 mm dostupný z [18]. V sestavě se nachází dvě tyto desky, které spojují sestavu dvou střížnic pomocí závitových tyčí a matic a pomocí vodících tyčí vymezují správnou polohu. Vodící tyče jsou následně zajištěny závlačkami. Abychom uložili hřídel s noži, nachází se na stěně kompenzační deska, na které se nachází ložisková jednotka, ve které je hřídel uložena. Popis kompenzačních desek a jejich funkce je popsán níže. Dále jsou na stěně vyvrtány díry pro uchycení síta, díry pro upevnění na rámu, díry se závitem pro uchycení madla a díry pro kolíky, které slouží k přichycení kompenzačních desek (podrobný popis je uveden níže).

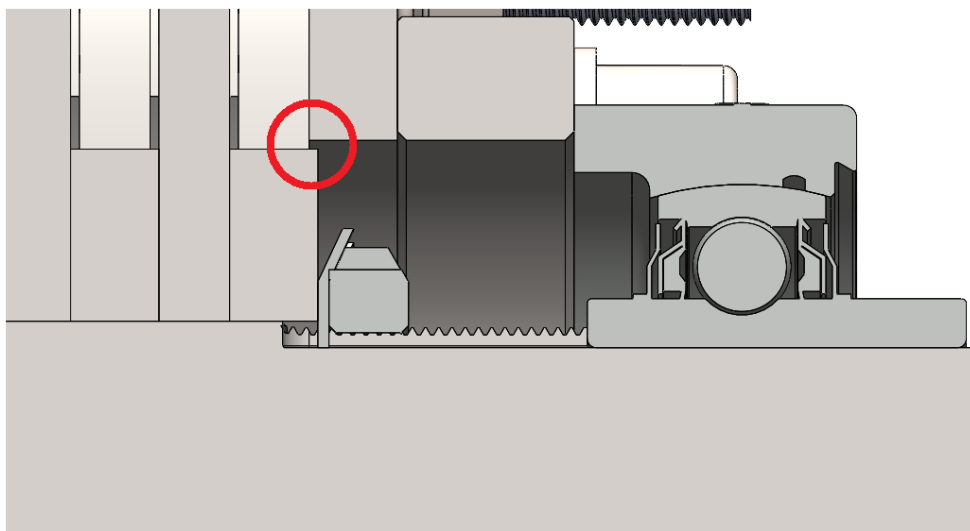


Obr. 5-16 Přední stěna

Popis označených děr na Obr. 5-16 dle čísel:

1. Pro vodící tyče
2. Pro závitové tyče
3. Díry se závitem M16, pomocí těchto děr a šroubů je zde upevněna kompenzační deska
4. Pro kolíky
5. Pro uchycení síta
6. Pro upevnění drtiče a k zamezení posuvu na rámu
7. Díra se závitem M5 pro uchycení madla

Důležitým konstrukčním prvkem je největší díra nacházející se uprostřed samotné stěny. Tato díra musí být větší než vložka rotujících nožů, díky tomu nedojde ke styku a tření vložek rotujících nožů a přední stěny viz Obr. 5-17 část označená červeným kruhem.

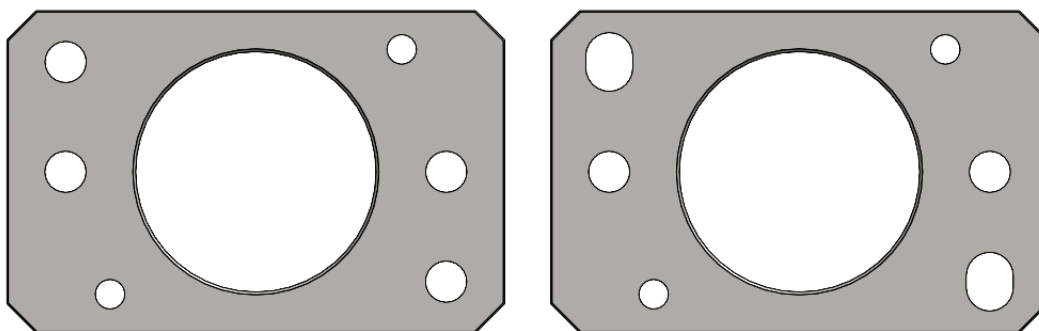


Obr. 5-17 Detail řezu sestavy drtiče

5.5.4 Kompenzační desky

Pomocí těchto desek a ložiskových domků je uložena hřídel drtiče. Jak lze vidět na Obr. 5-18, deska vpravo se od desky vlevo odlišuje pouze v tom, že má drážky. Deska nalevo je pevně uložena pomocí kolíků a šroubů na přední stěně a plní funkci pevné vazby. Aby bylo možné předejít výrobním nepřesnostem, jsou na druhé desce vytvořeny drážky. Deska tedy plní funkci posuvné vazby. Kompenzační desky jsou vyrobeny z konstrukční oceli S235JR a polotovarem je plech válcovaná za tepla dle EN 10051 o tloušťce 20 mm dostupný z [18].

Při montáži je nejdříve upevněna kompenzační deska (bez drážek) na kolíky, které slouží k vystředění desky a následně pomocí šroubů M16 je připevněna k přední desce. Dále je nasazena hřídel do ložiskového domku a ložiskový domek upevněn na kompenzační desce také pomocí šroubů M16. Následuje upevnění druhé desky. To je provedeno podobným způsobem, ale nejsou zde předvrtané díry pro kolíky. Deska je nejdříve s ložiskovým domkem a hřídelí vystředěna pomocí drážek a až poté se vyvrtají díry do kompenzační desky a přední stěny pro kolíky. Kolíky zajistí, aby hřídel drtiče byla vystředěna i při rozebrání a zpětném složení do původního stavu.

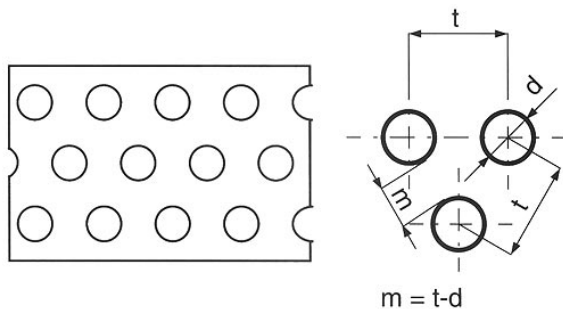


Obr. 5-18 Kompenzační desky

5.5.5 Síto

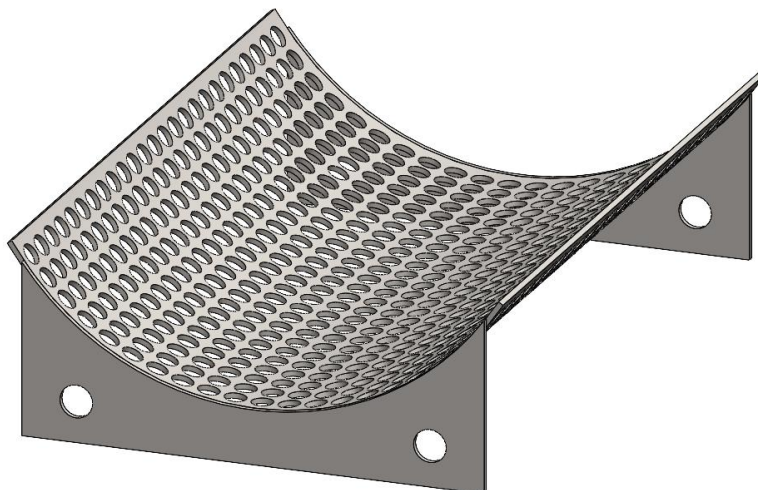
Síto je vyrobeno z děrovaného plechu viz Obr. 5-19, který je vyroben z oceli DC01-A-m o tloušťce 1 mm. Děrovaný plech je následně přivařen k úchytkám viz Obr. 5-20, které jsou vyrobeny ze stejného materiálu plechu o tloušťce 2 mm. Sestava síta je pomocí šroubů a matic upevněna na předních stěnách pod drtičem.

Plech válcovaný za studena děrovaný, kruhové otvory 8 mm přesazené rozteč 11 mm, EN 10130
// **rozměr 1x1000x2000**



Tloušťka		1,0 mm
Šířka		1000 mm
Délka		2000 mm
Rozteč	t	11 mm
Průměr otvorů	d	8 mm
Hmotnost		8,34 kg/tab.

Obr. 5-19 Detail polotovaru děrovaného plechu od firmy Feron [18]



Obr. 5-20 Sestava síta

Plech válcovaný za studena k tváření za studena, EN 10131
// **rozměr 2x1000x2000**

Norma:	ČSN EN 10131
Tloušťka	2 mm
Šířka	1000 mm
Délka	2000 mm
Úchylka kolmosti	u maximálně 1 % skutečné šířky
Mezní úchylka rovinnosti	8 mm
Mezní úchylka délky	+0,3 % délky 0 mm
Mezní úchylka šířky	+4 mm 0 mm
Tolerance přímosti q	max. 5 mm na délce 2 m

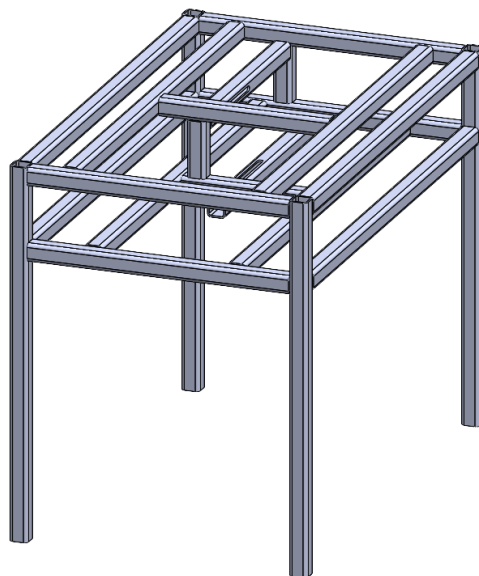
Obr. 5-21 Detail polotovaru plechu od firmy Feron [18]

5.6 Rám



Obr. 5-22 Rám drtiče

První návrh rámu viz Obr. 5-23 byl tvořen z tzv. jeklů o velikosti 40x40x3 z materiálu S235JRH. Jedná se zaručeně svařitelný materiál. Celá konstrukce by byla svařena. To vede k výraznému prodražení konstrukce. Dále také není zaručeno, že se při svařování některé jekly nepokroučí a výsledný rám by nemusel odpovídat návrhu. Proto byla provedena analýza a byl zvolen jiný typ provedení rámu.



Obr. 5-23 Původní rám drtiče

Rám drtiče bude tvořen dvěma typy hliníkových profilů. První profil pod označením 104040 viz Obr. 5-24 a druhý pod označením 104080 viz Obr. 5-25 od firmy ALUTEC KK s.r.o.

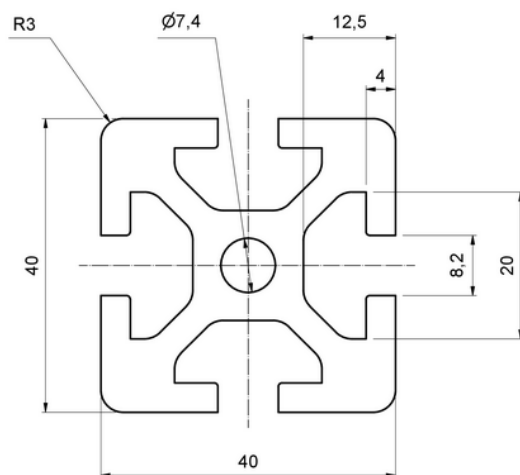
Výhody:

- Modulární
- Lehký
- Nemusí být svařen
- Doplnky usnadňující kompletaci konstrukce

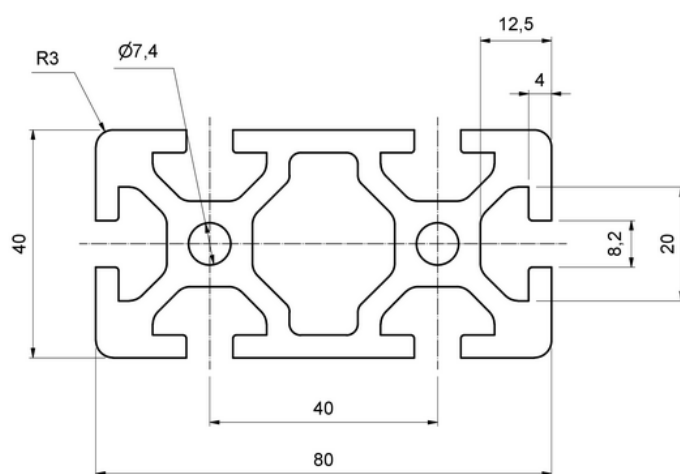
Nevýhody:

- Cena
- Tuhost konstrukce může být menší než u svařeného rámu

Cena hliníkových profilů je sice vyšší, ale vůči výhodám, které přináší, je to akceptovatelné. Výsledný rám z hliníkových profilů lze vidět na Obr. 5-22. Sestava je dále doplněna o pojezdová kolečka pro lepší přemísťování konstrukce a stavěcí patky, které vyrovnávají rozdíl výšek, který vznikl použitím pojezdových koleček.



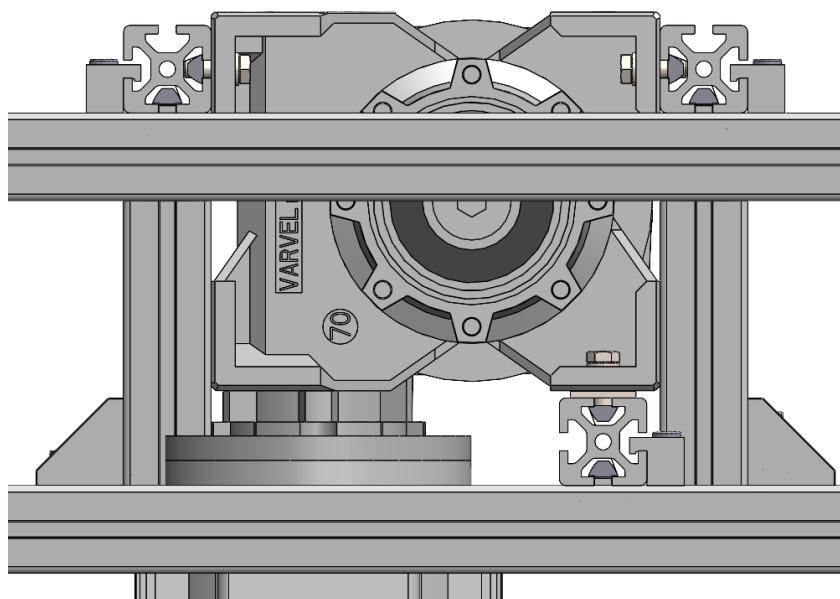
Obr. 5-24 Rozměry hliníkového profilu 104040 [21]



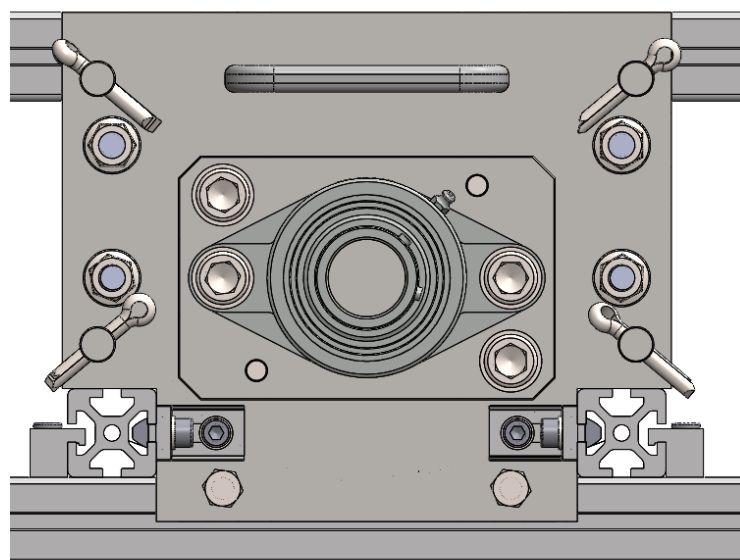
Obr. 5-25 Rozměry hliníkového profilu 104080 [21]

5.6.1 Uchycení pohonné jednotky a sestavy drtiče

Uchycení pohonné jednotky viz Obr. 5-26 je řešeno pomocí kompletačních doplňků jako jsou šrouby M8, podložky, matice s pružinou, fixační úhelníky, poziční spojky aj. doplňky. Podobným způsobem je řešeno uchycení drtiče. Drtič je položen uvnitř rámu na dva hliníkové profily viz Obr. 5-27 a pomocí šroubů, podložek, fixačních úhelníku a matic zajištěn. Kompletační doplňky jsou taktéž dodávány firmou ALUTEC KK s.r.o. [21].

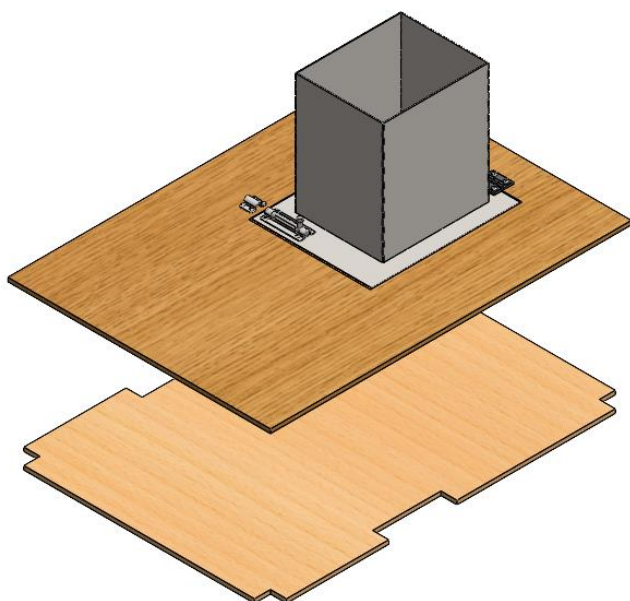


Obr. 5-26 Pohled uchycení pohonné jednotky k rámu



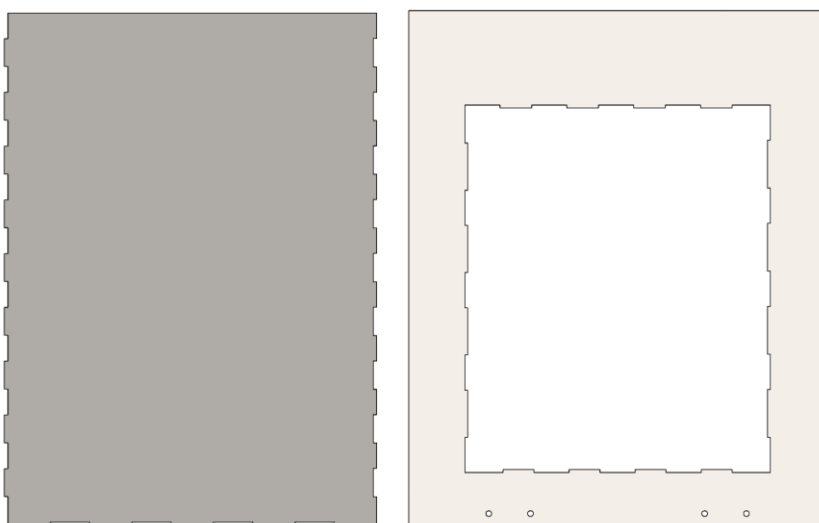
Obr. 5-27 Pohled uchycení drtiče k rámu

5.7 Krytování



Obr. 5-28 Krytování drtiče

Krytování drtiče viz Obr. 5-28 je tvořeno dvěma dřevěnými deskami. Horní dřevěná deska slouží jako pracovní stůl (prostor okolo drtiče) a spodní jako police, na které se nachází rozvaděč, ale také např. koš na drť vytvořenou drtičem. K horní desce je pomocí pantů připevněna plechová násypka, která plní funkci krytí pracovního prostoru drtiče a zároveň zachycuje vystřelující kusy z prostoru drtiče. Násypka je vyrobena z plechu materiálového označení DC01 viz Obr. 5-21 o tloušťce 2 mm a složena pomocí jazýčků a drážek viz Obr. 5-29. Aby nedocházelo k náhlému odklopení násypky, se na násypce nachází bezpečnostní posuvný zámek. Materiál násypky je dobře svařitelný, takže pokud by docházelo k nečekaným rozpadnutím, může být násypka svařena.



Obr. 5-29 Přední a spodní část násypky

6 DISKUZE

V rámci této bakalářské práce byl navržen drtič plastového odpadu poháněný elektromotorem se šnekovou převodovkou, který je uložen do hliníkového rámu a následně zakrytován. Návrh drtiče byl inspirován existujícími řešeními uvedenými v rešeršní části práce. Konstrukční řešení bylo navrhováno s ohledem na jednoduchost výroby a cenovou dostupnost.

Byly provedeny čtyři koncepční návrhy drtiče. První návrh obsahuje pouze jednohřídelový drtič, který je poháněn lidskou silou. Tato varianta se ve vícekritériální analýze zpočátku jevila jako vhodný adept, ale spolu s druhou variantou byly nakonec vyhodnoceny jako nejméně vhodné. Nejvhodnějším konceptem byla vyhodnocena varianta čtyři, která by měla vynikat v produktivitě, kompaktnosti a cenové dostupnosti.

U konstrukčního návrhu se jevil jako největší problém výpočet střižných podmínek. Tyto podmínky se odvíjí od geometrie rotujících a stacionárních nožů. Stacionární nože mají zakulacenou geometrii viz Obr. 5-12, proto bylo provedeno zjednodušení výpočtu pouze do jedné střižné roviny. V této rovině se vyskytuje problém stanovení střižné plochy, tedy tloušťky stříhaného materiálu, jelikož vstupní materiál není konstantního průřezu. U drcení může docházet ke kombinovanému namáhání, které není možné přesně určit.

Na základě výpočtu střižných podmínek byla vybrána pohonná jednotka. Dle maximálního výkonu a možného kroutícího momentu pohonu byla zkonstruována hřídel drtiče. Při návrhu se zjistilo, že pro zvolené spojení hřídelí pomocí pružné litinové spojky nebude stačit pouze jedno pero. Bude potřeba minimálně dvou per a musí být vyměněna původní krátká pružná spojka za delší verzi, aby vyšla kontrola pera na otláčení. Uložení hřídele, které je řešeno pomocí kompenzačních desek a ložiskových jednotek, je navrženo tak, aby byla možnost vystředění hřídele. Tato varianta se u komerčně řešených drtičů nevyskytuje, protože se díry do předních stěn vyrábí v rámci jedné operace a mírnou nesouosost vykompenzují ložiskové jednotky. Pravděpodobně z tohoto důvodu nemusí být použito kompenzačních desek.

Výsledný konstrukční návrh se skládá se čtyř sestav: pohonné jednotky, sestavy drtiče, rámu a krytování. Podrobněji byla vypracována sestava drtiče. Celek je tvořen dvěma střižnicemi, sestavou nožů na hřídeli, předními stěnami s celkovou hmotností 72,5 kg. Rám byl navržen z hliníkových profilů, které jsou lehké a modulární.

Jedná se o prvotní návrh prototypu drtiče, který musí být před sériovou výrobou podroben podrobnému testování nejlépe experimentálním způsobem.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vytvořit konstrukční návrh drtiče plastového odpadu určeného k drcení plastu vzniklého FDM technologií. Tento cíl byl úspěšně splněn stejně jako ostatní dílčí cíle práce.

V bakalářské práci byla provedena rešerše současných typů drtičů odpadu, stručný rozbor technologií a používaných materiálů v oblasti 3D tisku. Pomocí analýzy problému byl zvolen vhodný typ drtiče pro drcení plastů. Na základě vícekritériální analýzy byla vybrána nejlepší varianta ze čtyř koncepčních návrhů tohoto typu. Zvolený návrh byl rozebrán v konstrukční části. Byl vytvořen model celého zařízení včetně výrobních výkresů jednotlivých součástí a sestav.

Výstupem této práce je konstrukční návrh drtiče včetně rámu a krytování o maximálních rozměrech 986 x 1238 x 673 mm. Samotná sestava drtiče váží 72,5 kg. Drtič je určen ke zpracování základních materiálů 3D tisku, což jsou např. PLA, PVB, ASA, PETG.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VOŠTOVÁ, Věra a Jiří FRIES. *Zpracování pevných odpadů*. Praha: ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02672-8.
- [2] *Zpracování různých odpadů*. Odes s.r.o. 2014 [vid. 17. únor 2023]. Dostupné z: <http://www.odes.cz/zpracovani-ruznych-odpadu>
- [3] *Drtiče kameniva*. [vid. 20. prosinec 2022]. Dostupné z: http://tstsw.cz/stavebni_stroj/predmet-bw03/prednaska-4#kuželové-drtiče
- [4] Drcení. DSP Přerov s.r.o. [vid. 17. únor 2023]. Dostupné z: <https://www.dspprerov.cz/drceni/>
- [5] Obrázky od firmy Terier. TERIER s.r.o. [online]. 2010 [vid. 13. únor 2023]. Dostupné z: <http://www.terier.cz/cz/aktuality.htm>
- [6] Hřidelové drtiče. DEOS Technology s.r.o. 2016 [vid. 17. únor 2023]. Dostupné z: <https://www.deostech.cz>
- [7] Čtyřhřidelový drtič Q145. SSI Shredding System. [vid. 13. únor 2023]. Dostupné z: <https://www.ssiworld.com/en/>
- [8] *Válcový drtič*. [vid. 17. únor 2023]. Dostupné z: <https://www.opprimendi.cz/reference/valcovy-drtic-rcd-0915/>
- [9] *Drtič plastu*. 2020 [vid. 18. únor 2023]. Dostupné z: <https://www.sustainabledesign.studio>
- [10] *Drtič odpadu precious plastic*. [vid. 18. únor 2023]. Dostupné z: <https://preciousplastic.com/index.html>
- [11] *Plasticpreneur*. [vid. 21. únor 2023]. Dostupné z: <https://plasticpreneur.com>
- [12] NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T.Q. NGUYEN a David HUI. *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. B.m.: Elsevier Ltd. 15. červen 2018. ISSN 13598368.
- [13] MANTIHAL, Sylvester, Rovina KOBUN a Boon Beng LEE. *3D food printing of as the new way of preparing food: A review*. B.m.: AZTI-Tecnalia. 1. prosinec 2020. ISSN 18784518.
- [14] WANG, Xin, Man JIANG, Zuowan ZHOU, Jihua GOU a David HUI. *3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective*. 2017. ISSN 13598368.
- [15] FOREJT, Miloš a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.

- [16] VARVEL. *Pohonná jednotka*. [vid. 24. duben 2023]. Dostupné z: <https://varvel.com>
- [17] *Pružná spojka*. [vid. 5. květen 2023]. Dostupné z: <https://www.teatechnik.cz>
- [18] FERONA. *Polotovary*. 2023 [vid. 24. duben 2023]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz>
- [19] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [20] *Ložisko UCFL 207*. [vid. 18. květen 2023]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group>
- [21] *Hliníkové profily*. [vid. 18. květen 2023]. Dostupné z: <https://www.aluteckk.cz>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

s	stupeň drcení
z_1	maximální velikost zrna před zdrobňováním
z_2	maximální velikost zrna po zdrobňování
R_{80}	redukční poměr
D_{80}	okatosť síta, jímž propadne 80 % (hmotnostních) materiálu před zdrobňováním (mm)
d_{80}	okatosť síta, jímž propadne 80 % materiálu po zdrobňování (mm)
EU	Evropská unie
RP	rapid prototyping
FDM	fused deposition modelling
SLS	stereolitografie
SLA	selective laser sintering
PLA	polylactid acid, druh plastového materiálu
PVB	polyvinylbutyral, druh plastového materiálu
ASA	acrylonitrile styrene acrylate, druh plastového materiálu
PETG	glykolem modifikovaný polyethylene terephthalate, druh plastového materiálu
$k_{nože}$	koeficient počtu nožů v záběru
r	poloměr rotujícího nože
F	střižná síla
τ_s	střižné napětí
S	plocha průřezu ve střižné rovině
R_m	mez pevnosti drceného materiálu
R_{mP}	mez pevnosti plastu PLA a PVB
S_1	teoretická střižná plocha nožů
k_1	koeficient přepočtu střižné plochy dle geometrie nože
S_{k1}	přepočtená střižná plocha

F	střižná síla
F_{krit}	kritická střižná síla
M_{krit}	kritický moment
P_{mot}	výkon teoretického motoru
n_{mot}	otáčky teoretického motoru
ω_{krit}	kritická úhlová rychlost teoretického motoru
n_{krit}	kritické otáčky teoretického pohonu
i_{krit}	kritický/minimální převodový poměr
P_{motor}	výkon zvoleného motoru
n_{motor}	otáčky zvoleného motoru
η	účinnost šnekové převodovky
$\omega_{kritmot}$	kritická úhlová rychlost zvoleného pohonu
n_{pkrit}	kritické otáčky zvoleného pohonu
i_{pohon}	vypočtený převodový poměr pro zvolený pohon
i	zvolený převodový poměr pohonné jednotky
$n_{výstup}$	otáčky na výstupu pohonné jednotky
M_k	krouťící moment pohonné jednotky
M_{knom}, M_{kmax}	krouťící momenty pružného členu spojky – nominální, maximální
R_{mH}	mez pevnosti materiálu hřídele – C45
R_{eH}	mez kluzu materiálu hřídele – C45
d	průměr hřídele pod ložiskem A a B
l	délka pera
b	šířka pera
t_1	výška pera v náboji
p_0	základní hodnota tlaku pro náboj
p_d	dovolený tlak na bocích drážek v náboji
F_o	obvodová síla
p	vypočtený tlak na boku drážky
k_p	koeficient počtu funkčních stykových ploch per

$F_{A1}, F_{B1}, F_{A2}, F_{B2}$	síla ve vazbách A a B první a druhé varianty výpočtu
M_{omax}	maximální ohybový moment
M_{k1}	kroučící moment vzniklý od rotujících nožů drtiče
d_{min}	vypočtený minimální průměr hřídele
k_k	zvolená bezpečnost pro výpočet minimálního průměru hřídele
r_o, r_{oz}, r_{pero}	poloměr osazení – u ložisek, zápichu u šestihranu, v drážce pera
$d_{zápich}$	průměr hřídele v místě zápichu
d_{zmin}	minimální průměr závitu M40x1,5 pro třídu přesnosti 6g
D_{ξ}	vepsaný průměr šestihranu
$x_{oA}, x_{o\text{š}}$	vzdálenost osazení ložiska a zápichu u šestihranu od síly F_A
d_1	průměr hřídele v drážce pera
$\alpha_{\tau1}, \alpha_{\tau2}, \alpha_{\tau3}$	součinitelé vrubu pro krut nebezpečných míst 1–3
$\alpha_{\sigma2}, \alpha_{\sigma3}$	součinitelé vrubu pro ohyb nebezpečných míst 2 a 3
M_{o1}, M_{o2}, M_{o3}	ohybové momenty v nebezpečných místech 1–3
$\sigma_{nom1}, \sigma_{nom2}, \sigma_{nom3}$	nominální napětí v nebezpečných místech 1–3
$\tau_{knom1}, \tau_{knom2}, \tau_{knom3}$	smykové napětí v nebezpečných místech 1–3
$\sigma_{red1}, \sigma_{red2}, \sigma_{red3}$	redukované napětí v nebezpečných místech 1–3
$k_{k1}, k_{k2}, k_{k3}, k_{k4}, k_{k5}$	bezpečnosti k MSP v nebezpečných místech 1–5
L	základní trvanlivost ložiska
C_v	vypočtená základní dynamická únosnost ložiska
C	základní dynamická únosnost ložiska
%	procento
m	metr, jednotka délky
N	Newton, jednotka síly
Pa	Pascal, jednotka tlaku
W	Watt, jednotka výkonu
m^3/h	metry krychlové za hodinu
t/h	tuna za hodinu
ot/min	otáčky za minutu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Pracovní prostor bubnového drtiče [2].....	12
Obr. 2-2 Řez čelistového drtiče [4]	13
Obr. 2-3 Řez kuželového drtiče [4]	13
Obr. 2-4 Náhled do pracovního prostoru odrazového drtiče [4]	14
Obr. 2-5 Rotor jednohřídelového drtiče [5]	15
Obr. 2-6 Pracovní prostor dvouhřídelového drtiče [5].....	15
Obr. 2-7 Pracovní prostor čtyřhřídelového drtiče [7]	16
Obr. 2-8 Speciální drtiče: A – drtič nemocničního odpadu, B – drtič polystyrenu, C – Drtič skla [2].....	16
Obr. 2-9 Pohled na pracovní prostor válcového drtiče při instalaci [8].....	17
Obr. 2-10 Drtiče plastového odpadu: 1 – Shredder Basic, 2 – Shredder, 3 – Shredder Pro [9, 10].....	18
Obr. 2-11 Drtiče plastového odpadu firmy plasticpreneur [11]	18
Obr. 2-12 Zobrazení různého nastavení podpor [16].....	20
Obr. 2-13 Graf pevnostních zkoušek v tahu a ohybu	21
Obr. 2-14 Graf pevnostních zkoušek v tahu a ohybu	21
Obr. 2-15 Graf meze pevnosti.....	22
Obr. 2-16 Zobrazení směru tisku vzorku použitého při pevnostních zkouškách [17]	22
Obr. 2-17 Nože drtiče – vlevo: stacionární nůž, vpravo: rotující nůž	23
Obr. 2-18 Vložky – vlevo: mezi stacionární nože, vpravo: mezi rotující nože	24
Obr. 2-19 Síto	25
Obr. 2-20 Hřídel drtiče	25
Obr. 4-1 Náčrt koncepčního řešení	28
Obr. 4-2 Koncepční návrh drtiče	29
Obr. 4-3 Koncepční návrh drtiče	30
Obr. 4-4 Koncepční návrh drtiče	31
Obr. 4-5 Tabulka rozhodovacích kritérií	32
Obr. 4-6 Tabulka hodnoty kritérií.....	32
Obr. 4-7 Tabulka ohodnocení variant	33

Obr. 4-8 Tabulka trojúhelníkové metody	33
Obr. 4-9 Tabulka vyhodnocených variant	34
Obr. 5-1 Drtič plastu	35
Obr. 5-2 Maximální velikost frakce v záběru nože	36
Obr. 5-3 Plocha teoretické výplně	37
Obr. 5-4 Pohon drtiče [16]	39
Obr. 5-5 Pružná spojka [17]	39
Obr. 5-6 Hřídel drtiče	40
Obr. 5-7 Detail polotovaru od firmy Feron [18]	40
Obr. 5-8 Doplnující obrázek rozměrů působících sil na hřídeli	43
Obr. 5-9 Výsledné vnitřní účinky na hřídeli	44
Obr. 5-10 Ložisková jednotka SKF UCFL 207 [20]	48
Obr. 5-11 Sestava drtiče	48
Obr. 5-12 Pevný nůž a vložka	49
Obr. 5-13 Sestava střižnice	49
Obr. 5-14 Rotující nůž a vložka	50
Obr. 5-15 Řez sestavy rotujících nožů na hřídeli	50
Obr. 5-16 Přední stěna	51
Obr. 5-17 Detail řezu sestavy drtiče	52
Obr. 5-18 Kompenzační desky	52
Obr. 5-19 Detail polotovaru děrovaného plechu od firmy Feron [18]	53
Obr. 5-20 Sestava síta	53
Obr. 5-21 Detail polotovaru plechu od firmy Feron [18]	54
Obr. 5-22 Rám drtiče	54
Obr. 5-23 Původní rám drtiče	55
Obr. 5-24 Rozměry hliníkového profilu 104040 [21]	56
Obr. 5-25 Rozměry hliníkového profilu 104080 [21]	56
Obr. 5-26 Pohled uchycení pohonné jednotky k rámu	57
Obr. 5-27 Pohled uchycení drtiče k rámu	57
Obr. 5-28 Krytování drtiče	58

Obr. 5-29 Přední a spodní část násypky 58

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Hranice velikosti zrna při zdrobňování [1]	10
Tab. 2-2 Stupeň zdrobnění drtičů a mlýnů [1]	11
Tab. 2-3 Technické specifikace drtičích strojů [9, 10]	17
Tab. 2-4 Technické specifikace drtičů plastového odpadu [11].....	18
Tab. 2-5 Mechanické vlastnosti materiálů pro 3D tisk [17].....	21
Tab. 5-1 Hodnoty dovoleného tlaku dle materiálu a zatížení pro druhy spojů [19].....	41

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Katalogový list pohonné jednotky od firmy VARVEL

Příloha 2 Výkresová dokumentace