



Bakalářská práce

Zařízení pro mletí recyklovaného skla pro robocasting

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Jonáš Mikmek

Vedoucí práce:

Ing. Marie Stará, Ph.D.

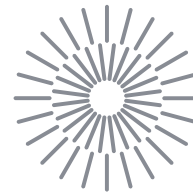
Katedra sklářských strojů a robotiky

Konzultant práce:

Ing. Michal Starý, Ph.D.

Katedra sklářských strojů a robotiky

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Zařízení pro mletí recyklovaného skla pro robocasting

<i>Jméno a příjmení:</i>	Jonáš Mikmek
<i>Osobní číslo:</i>	S20000078
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra sklářských strojů a robotiky
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

Inovativní technologie 3D tisku skla klade specifické požadavky na přípravu vstupní suroviny, která je s výhodou tvořena recyklovaným sklem. Příprava skelného nosiče o požadované granulometrii vyžaduje několik kroků, od hrubého nadrcení po jemné mletí. Cílem bakalářské práce je konstrukční řešení zařízení flexibilních parametrů pro získání jemné drtě o žádané granulometrii pro následné technologické zpracování formou 3D tisku technologií extruze, tzv. robocasting.

Úkolem Vaší BP bude:

1. Provést zevrubnou rešerši v oblasti technologie mletí s důrazem na sklo.
2. Ve variantách realizovat návrh koncepce mechaniky a systému pohonu zařízení pro získání jemné drtě skla.
3. Zpracovat 3D model zařízení flexibilních parametrů pro získání jemné drtě skla.
4. Zhodnotit přínos předloženého řešení včetně ekonomického zhodnocení.

Rozsah grafických prací: výkresová dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 30 – 40 stran textu
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

1. BELDA, Jaroslav. *Sklářské a keramické stroje*. Sv. 1. 2. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1994.
2. HOTAŘ V., V. KLEBSA a I. MATOUŠEK. *Technologie automatické výroby skla*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015, 318 s.
3. Podklady na internetu (text, obrázky, videa), např.:
<https://www.jipo-desna.cz/produkty/mlyn-kulovy-s-vikem>
<https://www.jipo-desna.cz/produkty/mleci-stroj-pro-kulovy-mlyn>
<https://www.optingservis.cz/index.php/26-laboratorni-pristroje/laboratorni-pristroje/37-kulovy-mlyn-na-keramiku-mleci-nadoby>
<https://www.artikstudio.cz/prumyslove-keramicke-stroje/stroje-pro-mleti-materialu/>
<https://www.keramickepece.cz/cs/kulove-mlyny/1232-kulovy-mlyn-km-01-r-s-regulaci-otacek.html>

Vedoucí práce: Ing. Marie Stará, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Konzultant práce: Ing. Michal Starý, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Datum zadání práce: 4. listopadu 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 4. května 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 4. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Název práce

Zařízení pro mletí recyklovaného skla pro robocasting.

Anotace

Cílem této bakalářské práce je navrhnout konstrukční řešení zařízení flexibilních parametrů pro získání jemné drtě o žádané granulometrii, která se využije v různých technikách 3D tisku skla, např. v technologii materiálové extruze, tzv. robocasting. Nejprve je provedena zevrubná rešerše v oblasti technologie mletí s důrazem na sklo. Dále je ve variantách realizován návrh koncepce mechaniky a systému pohonu zařízení pro získání jemné drtě skla. Následně je zpracován 3D model zařízení flexibilních parametrů pro získání jemné drtě skla. Na závěr je zhodnocen přínos předloženého řešení včetně ekonomického zhodnocení.

Klíčová slova

Mlýny, Kulový mlýn, Dezintegrace, Recyklace, Sklo, 3D tisk skla, Konstrukce mlecího zařízení.

Title

Device for Recycled Glass Grinding for Robocasting.

Annotation

The main goal of this bachelor thesis is the design solution of a milling device with flexible parameters to obtain fine grit with the desired granulometry, which will be then used in various 3D glass printing techniques, e.g., in material extrusion technology, called robocasting. First, in-depth research is conducted in the field of crushing technology, with an emphasis on glass. Furthermore, the design concept of the mechanics and drive system of the device is implemented to obtain fine glass powder in the variants. Subsequently, a 3D model of the device with flexible parameters is processed to obtain fine glass powder. Finally, an assessment of the benefits of the proposed solution, including the economic evaluation, is made.

Key words

Mills, ball mills, disintegration, recycling, glass, glass 3D printing, construction of milling device.

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval Ing. Marii Staré, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, podněty i připomínky k dané problematice.

Dále panu Ing. Michalu Starému, Ph.D. za praktické konzultace konstrukční a výkresové části práce, panu Ladislavu Havlíkovi za pomoc při praktické realizaci a své sestře Amálii Mikmekové za korekturu a připomínky ke gramatice a větné stavbě.

Také bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu a fandovství.

Obsah

ÚVOD	13
1. ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	14
1.1. 3D TISK.....	14
1.1.1. SLM.....	15
1.1.2. Robocasting	16
1.1.3. Využití 3D tisku pro skelné materiály.....	17
1.2. RECYKLACE	17
1.2.1. Recyklace skla.....	17
1.3. MLECÍ ZAŘÍZENÍ	19
1.4. DEZINTEGRACE	20
1.5. MLÝNY.....	21
1.5.1. Kulový mlýn	21
1.5.2. Mlecí nádoba.....	24
2. KONCEPČNÍ NÁVRH MLECÍHO ZAŘÍZENÍ	25
2.1. POHON MLECÍHO ZAŘÍZENÍ.....	26
2.1.1. Převod čelními ozubenými koly.....	26
2.1.2. Převod šnekovým soukolím.....	26
2.1.3. Převod řemenem	27
2.2. VÁLCE.....	28
2.2.1. Válec v celku	28
2.2.2. Válec tvořený segmenty.....	28
2.3. VÝSLEDNÁ VARIANTA.....	29
3. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ MLECÍHO ZAŘÍZENÍ	29
3.1. NOSNÝ RÁM.....	31
3.2. NÁDOBA S MLECÍMI KULIČKAMI.....	32
3.3. POHON S ŘEMENOVÝM PŘEVODEM.....	32
3.3.1. Elektromotor s frekvenčním měničem	33
3.3.2. Elektronika a ovládání zařízení	34
3.3.3. Návrh řemenového převodu a volba řemene	35
3.3.4. Silové výpočty řemenu	37
3.4. HNACÍ A HNANÝ VÁLEC	37
3.4.1. Optimální rozteč válců (hřidelí)	38
3.4.2. Ložiska SKF.....	40
3.4.3. Výpočet trvanlivosti ložisek	41

3.4.4. Ložiskové domky	43
3.5. ZAKRYTOVÁNÍ	44
4. TECHNICKOEKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	44
4.1. TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ	44
4.2. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	47
ZÁVĚR.....	49
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51
SEZNAM VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE A PŘÍLOH	55

Seznam použitých značek a symbolů

a	Přibližná osová vzdálenost	[mm]
B_1	Šířka ložiska	[mm]
C_{01}	Základní únosnost ložiska statická	[kN]
C_1	Opravný součinitel délky řemenu	[-]
C_2	Provozní faktor	[-]
C_3	Opravný součinitel úhlu opásání	[-]
C_1	Základní únosnost ložiska dynamická	[kN]
CC	Osová vzdálenost	[mm]
CC_{max}	Maximální osová vzdálenost	[mm]
CC_{min}	Minimální osová vzdálenost	[mm]
$CC_{p max}$	Maximální návrhová osová vzdálenost	[mm]
$CC_{p min}$	Minimální návrhová osová vzdálenost	[mm]
D	Průměr bubnu	[mm]
d_1	Vnitřní průměr ložiska	[mm]
D_1	Vnější průměr ložiska	[mm]
D_v	Průměr válce	[mm]
d_f	Průměr hnací řemenice	[mm]
D_f	Průměr hnané řemenice	[mm]
F	Užitečná obvodová síla	[N]
F_0	Potřebné předpětí řemene	[N]
F_b	Celková síla od bubnu působící na hřídel	[N]
F_{bx}	Síla od bubnu působící na hřídel ve směru x	[N]
F_{by}	Síla od bubnu působící na hřídel ve směru y	[N]

F_h	Síla vyhazující buben	[N]
F_{hmax}	Maximální síla vyhazující buben	[N]
f_k	Tření v klínové drážce řemenice	[-]
F_p	Síla pro překlopení	[N]
F_{rx}	Síla od řemene působící na hřídel ve směru x	[N]
F_{ry}	Síla od řemene působící na hřídel ve směru y	[N]
F_v	Síla působící z bubnu na válec	[N]
F_{vx}	Síla působící z bubnu na válec ve směru x	[N]
F_{vl}	Největší síla v řemeni	[N]
F_{vr}	Síla působící na hřídel	[N]
g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]
G_b	Tíhová síla bubnu	[kN]
i	Celkový převodový poměr mlecího zařízení	[-]
i_{vb}	Převodový poměr z válce na buben	[-]
i_f	Převodový poměr řemenu	[-]
l_{1-5}	Rozměry potřebné pro výpočet reakcí v ložiskách	[mm]
L_d	Délka řemenu	[mm]
l_{h10}	Trvanlivost ložiska	[hod]
l_{rozt}	Rozteč disků	[mm]
l_{val}	Rozteč válců	[mm]
M	Krouticí moment	[Nm]
m_b	Hmotnost mlecího bubnu	[kg]
M_h	Krouticí moment na válci	[Nm]
MIA	Přídavek na montáž	[mm]

M_k	Jmenovitý moment motoru	[Nm]
M_{kb}	Krouticí moment na bubnu	[Nm]
m_1	Hmotnost ložiska	[kg]
M_r	Krouticí moment od řemenu	[Nm]
MTA	Přídavek pro napínání	[mm]
n	Rychlost otáčení	[min ⁻¹]
n_1	Rychlost otáčení vstupní	[min ⁻¹]
n_2	Rychlost otáčení výstupní	[min ⁻¹]
n_{kr}	Kritická rychlost otáčení	[min ⁻¹]
n_m	Jmenovitá rychlost otáčení motoru	[min ⁻¹]
N_r	Počet řemenů	[-]
n_v	Rychlost otáčení válce	[min ⁻¹]
p	Exponent rovnice trvanlivosti pro kuličková ložiska	[-]
P_1	Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska	[kN]
P_b	Celkový základní jmenovitý výkon řemene	[W]
P_d	Návrhový výkon	[W]
P_i	Jmenovitý výkon řemene stanovený na základě převodového poměru	[W]
P_r	Jmenovitý výkon řemene	[W]
P_{re}	Výkon elektromotoru	[W]
P_z	Základní jmenovitý výkon řemene	[W]
r_1	Poloměr zaoblení ložiska	[mm]
R_A	Výsledná radiální síla působící na ložisko A	[N]
R_{Ax}	Reakce v ložisku A, směr x	[N]
R_{Ay}	Reakce v ložisku A, směr y	[N]

R_{Az}	Reakce v ložisku A, směr z	[N]
R_B	Výsledná radiální síla působící na ložisko B	[N]
R_{Bx}	Reakce v ložisku B, směr x	[N]
R_{By}	Reakce v ložisku B, směr y	[N]
R_{Bz}	Reakce v ložisku B, směr z	[N]
R_{max}	Výsledná maximální radiální síla působící na ložiska	[N]
α	Úhel opásání malé řemenice	[°]
α_1	Úhel opásání malé řemenice	[°]
α_r	Úhel natočení řemene od svislé polohy	[°]
$\beta/2$	Úhel sklonu řemene	[°]

Úvod

Historie sklářství se obecně datuje do doby 3000 let př. n. l., mezi nejstarší skleněné výrobky, které se dochovaly, patří drobné skleněné korálky, perly, knoflíky a šperky, které sloužily i k ozdobným účelům. Zásadní rozmach ve výrobě skla přinesl vynález sklářské píšťaly. Pokrokovým stoletím lze označit 20. století, kdy vznikla celá řada nových výrobních technologií. Výroba skla je energeticky náročný výrobní proces, jelikož dochází k tavení sklářské vsázky při značně vysokých teplotách.

V současné době je velice populární upcyklace sklářského odpadu. Skleněné střeby nalézají nové uplatnění a proměňují se v nové produkty za nižší energetické náročnosti a snížené ekologické zátěže, kterou provází tradiční výroba skla. Touto cestou se vydalo pracoviště katedry sklářských strojů a robotiky (dále jen „KSR“) na Technické univerzitě v Liberci, které využívá rozemletého upcyklovaného skla při 3D tisku skla různými technikami. Zde je zapotřebí mít jemně namletý prášek skelněného recyklátu různé granulometrie.

Práce je členěna do čtyř kapitol. První kapitola se zabývá současným stavem. Nejprve je popsán princip 3D tisku a recyklace. Následně je ukázáno současné mlecí zařízení, rozebrán princip dezintegrace a typy mlýnů s mlecími podmínkami. Dále se práce věnuje koncepčnímu návrhu zařízení, z něhož vzešlo vlastní konstrukční řešení mlecího zařízení, a pokračuje volbou a výpočty jednotlivých komponent s ohledem na funkci, skladové zásoby, náročnost výroby a cenovou kalkulaci. Na závěr je technickoekonomické zhodnocení, kde je zhodnoceno provedení konstrukce s ohledem na výrobu a náklady.

1. Rozbor současného stavu

Předmětem bakalářské práce je navrhnout a zkonstruovat zařízení flexibilních parametrů, využívané pro mletí recyklovaného skla o požadované granulometrii, které bude dále využíváno pro zpracování různými technikami 3D tisku a při vyvíjení speciálních skelných hmot. Na pracovišti KSR je namletý materiál – recyklát (Obr. 1) – potřeba pro vyvinuté zařízení, využívající techniku SLM, a dále se bude namletý skleněný materiál využívat pro porézní skleněnou hmotu, jež je vstupním materiálem techniky extruze, tj. robocasting.



Obr. 1 Namletý skelný recyklát (obalové sklo) různé granulometrie:

1 – velikost zrn 125 μm až 500 μm , 2 – velikost zrn do 125 μm ,

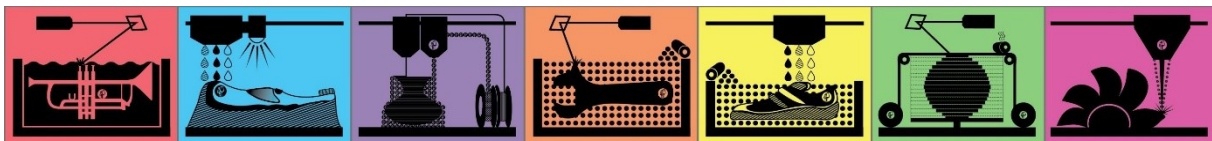
1.1. 3D tisk

Aditivní technologie, v dnešní době známé také pod názvem 3D tisk, označují technologie, při kterých je vyráběný díl vytvářen postupným přidáváním materiálu po vrstvách. Rychlé rozšíření aditivních technologií v poslední době nastalo díky možnosti snadné a rychlé výroby tvarově složitých prototypů z různých materiálů. Díky takto vyrobeným dílům lze ověřit požadované parametry, smontovatelnost a funkci sestav dílů přímo ve vývojovém centru. Zároveň často nabízejí snížení hmotnosti a finančních nákladů.

Modely, u kterých je v první řadě kladen důraz na design, jsou důležitou součástí při propagaci společností a jejich výrobků. Oproti dílům vyráběným konvenčními metodami obrábění lze získat topologicky optimalizované součásti s odlehčenou strukturou využívané například v letectví. V automobilovém průmyslu nachází 3D tisk, mimo jiné, uplatnění při návrhu a testování rozměrů. V lékařském sektoru se stále více využívají aditivně vyráběné implantáty a zařízení. [1]

Norma ISO/ASTM 52900:2015 (Additive Manufacturing – General Principles – Terminology) rozděluje aditivní technologie do sedmi základních skupin (Obr. 2):

- vat photopolymerization (fotopolymerace)
- material jetting (nanášení tryskáním)
- material extrusion (vytlačování materiálu)
- powder bed fusion (spékání práškové vrstvy)
- binder jetting (tryskání pojiva)
- sheet lamination (laminace plátů)
- directed energy deposition (přímé energetické nanášení) [2, 3]



Obr. 2 Zásadní aditivní technologie, zleva:

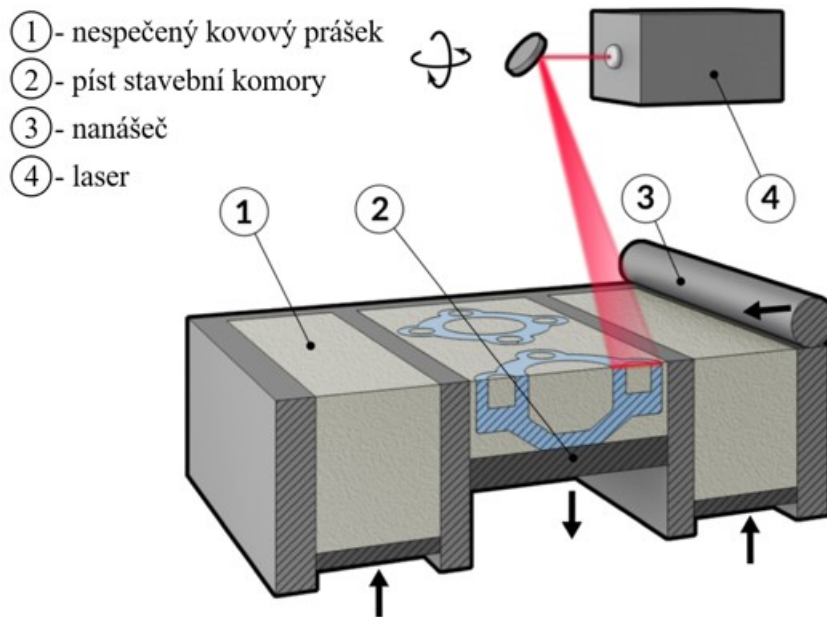
vat photopolymerization (fotopolymerace), material jetting (nanášení tryskáním), material extrusion (vytlačování materiálu), powder bed fusion (spékání práškové vrstvy), binder jetting (tryskání pojiva), sheet lamination (laminace plátů), directed energy deposition (přímé energetické nanášení) [4]

Na základě průzkumu trhu existuje velké množství různých metod 3D tisku, avšak pro tisk skla jsou vhodné jen některé z nich. Vyvinuté mlecí zařízení je primárně určeno pro jemné mletí skleněného odpadu různé granulometrie sloužící primárně jako vstupní materiál při tisku technikou SLM, spadající do skupiny powder bed fusion, a metodu materiálové extruze. Obě tyto techniky jsou vyvíjeny na pracovišti KSR.

1.1.1. SLM

Selective laser melting, označováno SLM, je jedna z metod 3D tisku. Využívá se při ní výkonný laser k tavení prášků nejčastěji kovových materiálů. Touto metodou lze vytvořit plně díly s komplexní geometrií.

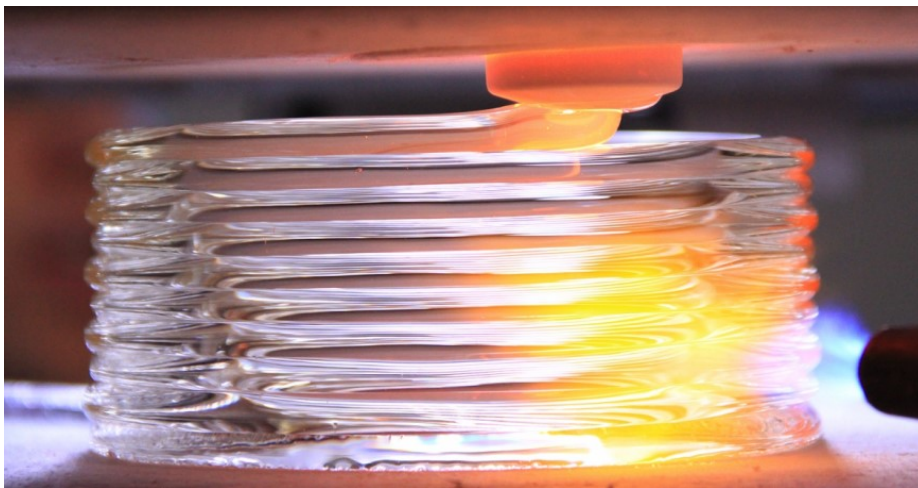
Proces začíná na desce, kam se nanese tenká vrstva prášku ze zásobníku, kterou počítačem řízená jednotka s laserovou hlavou taví v místech definovaných geometrií modelu. Poté se deska posune o tloušťku vrstvy dolů a proces pokračuje dalším nanesením vrstvy prášku. Tento proces se opakuje, dokud není celý díl hotový. Zařízení pro 3D tisk metodou SLM je znázorněno níže (Obr. 3). Po dokončení samotného tisku musí dělník díl vyjmout z tiskárny a oddělit od desky. V případě potřeby následují dokončovací operace, zejména broušení. Jelikož během tisku není nutná stavba podpor, jejichž funkci plní nespečený prášek, odpadá i náročný proces odstraňování podpor, nutný u některých metod 3D tisku.



Obr. 3 Zařízení pro 3D tisk metodou SLM [5]

1.1.2. Robocasting

Do techniky vytlačování materiálu se řadí metoda tzv. robocasting, nebo také Direct ink writing, založený na vytlačování materiálu v pastovitém stavu tryskou (Obr. 4). K vytlačování materiálu dochází pomocí pístu, který bývá ovládán buď mechanicky, nebo pneumaticky.



Obr. 4 Extruze skla [6]

1.1.3. Využití 3D tisku pro skelné materiály

Oběma výše zmiňovanými technikami 3D tisku skla se zabývá pracoviště KSR. Na rozdíl od tisku z kovových prášků technikou SLM mají křemičité materiály mnohem menší hustotu, a je tedy nutné skelné prášky/směsi po nanesení každé vrstvy ztuhnout přitlačnou deskou. Za tímto účelem bylo i vhodně konstrukčně řešeno vyvinuté zařízení na bázi SLM. Druhá technika, která bude využívat namletý skleněný recyklát v podobě speciální skelné hmoty, je tzv. robocasting. Z počátku se nedařilo tisknout čiré sklo, avšak v poslední době se již začínají objevovat zařízení umožňující 3D tisk čirého skla. [7]

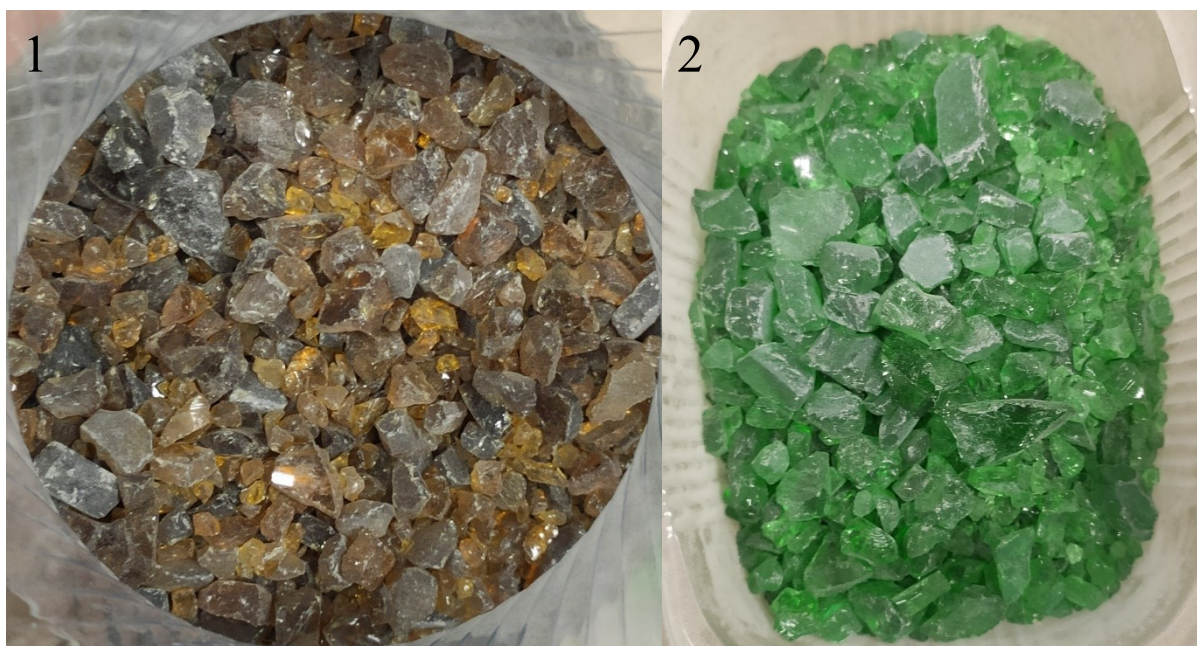
1.2. Recyklace

Vzhledem k energetické náročnosti, která provází výrobu a zpracování skla, zejména vysoce teplotní tavení sklářského kmene, je kladen důraz na recyklaci a tím i snížení potřebného množství vstupních surovin. Díky opakovanému využití materiálu z již rozbitých nebo opotřebených věcí také klesají náklady na výrobu, spotřeba energie a nároky na uskladnění odpadu, při němž hrozí nebezpečí znečištění vody. Například v České republice, kde je velká část odpadu tříděna, je problémem právě recyklace, která není dostatečná, tudíž velká část odpadu stejně skončí na skládce nebo ve spalovně. [8]

1.2.1. Recyklace skla

Sklo se dá velmi snadno recyklovat bez ztráty jeho vlastností, tudíž se dá znovu použít teoreticky donekonečna. Díky možnosti recyklace velké části surovin se šetří energie jinak nutná na jejich těžbu a výrobu. Vytříděné a všech nečistot zbavené sklo se vrací do skláren, tedy nejsou nutná další zařízení pro zpracování recyklátu. Výrobky z recyklovaného skla jsou zdravotně nezávadné.

Nejprve se skleněný odpad manuálně třídí podle barvy. Čistota je zvláště pak zásadní u čirého skla, jehož výroba je citlivá na barevné příměsi, při výrobě zeleného skla nejsou požadavky na čistotu tak vysoké. Na počátku stojí rozdrcení skla na drť. Poté je nutné odstranit všechny příměsi negativně ovlivňující výsledný výrobek. Odstraňují se například kovy, keramika, porcelán, drátěné sklo, plasty, papír, zrcadla a korek. Zatímco feromagnetické látky lze odstranit pomocí magnetu, další nečistoty se odstraňují za pomoci optických senzorů. Následně se vytrízené sklo znovu drtí (Obr. 5). [9–14]



Obr. 5 Nadrcené recyklované (obalové) sklo
1 – hnědé, 2 – zelené

Je možné sklo před zpracováním nejen barvit, ale i odbarvit. Pomocí chemického odbarvování manganem nebo oxidem nikelnatým lze získat čistou sklovinu.

Podíl skleněných střepů z recyklátu ve výsledné sklářské vsázce bývá kolem 30–40 % a usnadňuje její tavení.

Utavit skleněné střepy je méně energeticky náročné a na základě realizovaných experimentů na pracovišti s křemičitými písky bylo prokázáno, že stačí poměrně malá intenzita CO₂ laseru k jejich natavení (Obr. 6). V případě testování různých druhů jemně mletých skleněných prášků (lahvové, obalové, krystalín atd.) různé granulometrie bude snadněji docházet k roztavení prášku namletého skla a tím i proces 3D tisku bude mnohem efektivnější a méně nákladný. [14, 15]

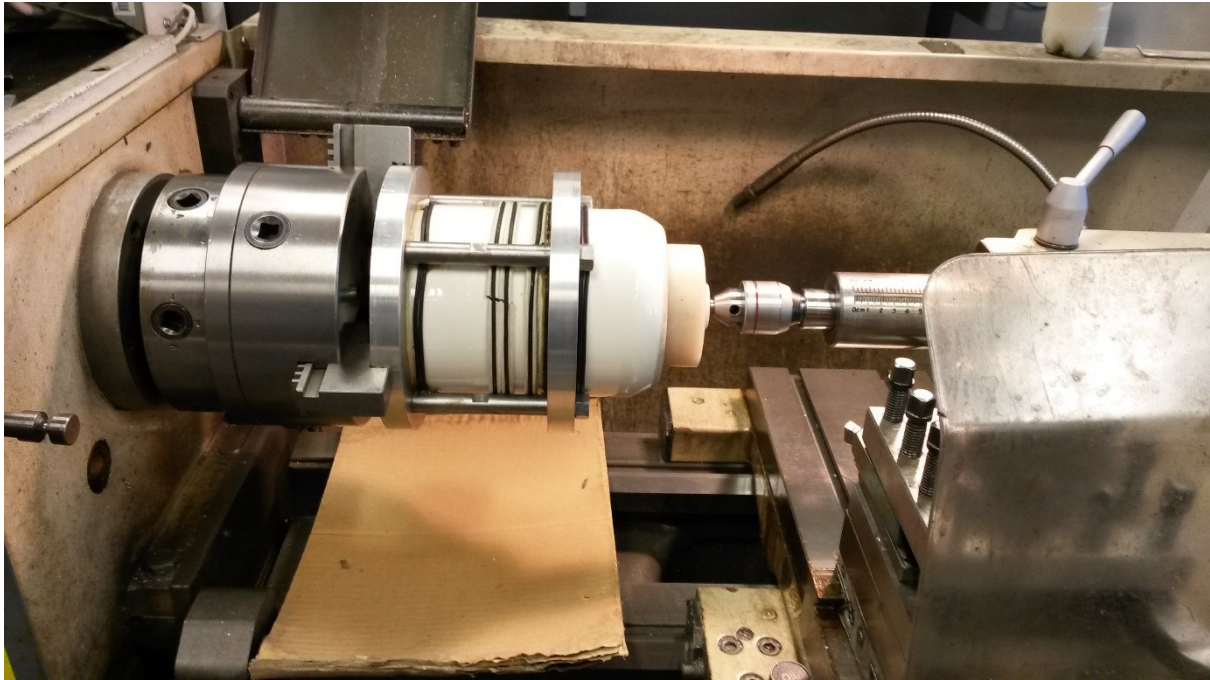


Obr. 6 Experiment realizovaný s křemičitými písky, CO₂ laser s maximálním výkonem 40 W. Vzorek V2, experiment byl realizovaný s různou rychlostí a výkonem.

V2a – výkon laseru CO₂ 20 W a rychlost 1 mm/s
V2b – výkon laseru CO₂ 20 W a rychlost 0,5 mm/s
V2c – výkon laseru CO₂ 40 W a rychlost 1 mm/s

1.3. Mlecí zařízení

V současné době je mletí skleněných střepek provizorním způsobem realizováno v keramické nádobě kulového mlýnu (objem 1,3 l) uchycené v přípravku na univerzálním soustruhu SPF-1000P firmy Proma. Přípravek je na jedné straně uchycen do univerzálního sklíčidla a na druhé straně je nádoba podepřena hrotem přes plastovou vložku (Obr. 7).



Obr. 7 Uchycení mlecího bubnu v přípravku pro mletí na soustruhu

Vstupním materiálem jsou nadrcené skleněné střepek velikosti do 12 mm (Obr. 5). Pro mletí je na soustruhu zařazeno 62 ot min^{-1} a pomocí frekvenčního měniče jsou regulovány na 60 % až 80 %, tedy výsledná rychlost otáčení při mletí se pohybuje kolem 40 ot min^{-1} až 50 ot min^{-1} . Tímto způsobem mletí je dosahováno požadovaných parametrů, primárně jemnosti skelné drtě. Po procesu mletí je materiál přesíván na sítích pro oddělení jednotlivých frakcí (Obr. 1). Čas potřebný pro mletí se pohybuje kolem 3 až 8 hodin, dle materiálu a množství skla v dávce, přičemž některé materiály je potřeba mlít až 24 hodin. Vzhledem k dlouhým strojním časům dělník nemůže soustruh používat na další potřebnou práci. Za tímto účelem je tedy vhodné navrhnout, zkonstruovat a na závěr práce vyrobit samostatné mlecí zařízení s odpovídajícími parametry a mletí přesunout na něj.

1.4. Dezintegrace

Tento termín je využíván v jaderné fyzice, kde označuje jadernou reakci, ale také v jiných odvětvích s významem rozpojování, rozmělnování a drcení, primárně za účelem zmenšení velikosti, přičemž lze v některých případech dosahovat nanorozměrů. [16]

Mechanického rozpojení materiálu se dosáhne působením vnějších sil, které způsobí porušení soudržnosti. K rozpojování dochází mezi tvarovými plochami nebo za pomoci dynamického účinku nárazů zrna do tvarové plochy či jiného zrna. Namáhání může být vyvoláno: tlakem, střihem, ohybem, rázem a také tahem, avšak tahová napětí bývají minimální. Hlavní vlastnosti zrna ovlivňující tento proces jsou: tvrdost, křehkost, pružnost, hustota, tvar a velikost.

Současně se zmenšováním velikosti zrn se výrazně zvětšuje celkový povrch rozpojovaného materiálu. To je důležitou součástí při zpracování v mnoha procesech, ve kterých získáme prášek jako finální produkt nebo surovinu pro další zpracování. Jako výhody je toho využíváno například ve farmacii, u látek dále zpracovávaných s využitím chemické reakce, nebo ve strojírenství, kde se vyrábí prášky tvrdých kovů a oxidů jako vstupní surovina práškové metalurgie. Prášková metalurgie je nákladově efektivní proces, při němž se lisováním a následným spékáním různých prášků kovů, jejich kompozicí, případně keramiky vyrábí polotovary bez potřeby tavení a odlévání. Získáváme tím možnost zpracovávat materiály s vysokou teplotou tání, oxidy kovů a slinuté karbidy.

Proces zmenšování zrn je energeticky náročný a vysoce neefektivní – pouhých cca 5 % přiváděné energie je využito na rozpojení zrn a se snižující se požadovanou velikostí efektivita dále klesá. Velká část energie se přeměňuje na teplo. [17–21]

Tyto procesy se dělí podle velikostí jak vstupních, tak výstupních zrn na hrubé, označováno jako drcení, a jemné neboli mletí. Drcení slouží např. k oddělení nerostu od jaloviny, jedné složky ve vícesložkových surovinách a pro rozdrobení. Účinnost drcení, popř. mletí, je vyjádřena poměrem velikosti největšího zrna před začátkem procesu a po skončení procesu (Tab. 1). Při mletí dochází k mechanickému rozpojování, které vytváří mnohem jemnější zrna než při drcení. Jelikož jsou částice rozmělnovány nahodile, není možné dosáhnout stejné velikosti všech zrn. Podíl zastoupení jednotlivých velikostí získáme granulometrickým tříděním, nejčastěji dynamickými třídíči. Výsledky lze interpretovat pomocí distribuční křivky. [16, 22–24]

Tab. 1 Dosahované účinnosti drcení a mletí v závislosti na použitém zařízení [25]

Zařízení	Typ zařízení	Účinnost drcení a mletí
Drtiče	Čelist'ové	3 až 6
	Kuželové ostroúhlé	5 až 7
	Kuželové tupoúhlé	5 až 20
	Válcové s hladkými válci	3 až 4
	Válcové s ostnatými válci	8 až 10
	Kladivové jednorotorové	10 až 15
	Odrazové	10 až 40
Mlýny	Tyčové	12 až 30
	Kulové	50 až 100
	Autogenní	80 až 200

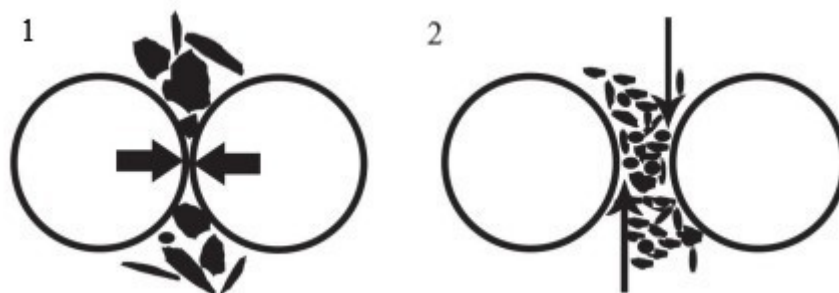
Dále existují v dané problematice termíny jemné mletí, nepřesahující velikosti zrna 100 μm , ultrajemné mletí, nepřesahující velikosti zrna 10 μm , a vysokorychlostní a vysokoenergetické mletí. Speciální typy mletí, jako je vysokorychlostní a vysokoenergetické, využívají část energie na oxidaci a výměnné reakce, mechanickou aktivaci, případně mohou nastávat fázové změny už v procesu mletí. Při mechanické aktivaci se tvoří nanočástice, při fázových změnách vznikají mechanické slitiny kovových prášků nebo probíhají krystalické reakce. [17, 19]

1.5. Mlýny

V mlýnech se využívají různé tvary mlecích těles, nejčastěji koule, tyče, případně jiné. Na základě experimentálních poznatků společností zabývajících se problematikou mletí se v průběhu let z praktického a ekonomického hlediska nejvíce osvědčilo využití koulí. Výhodnost vyplývá i z tabulky (Tab. 1), z níž je zřejmé, že pomocí kulových mlýnů lze dosáhnout velké účinnosti procesu. [26]

1.5.1. Kulový mlýn

Kulový mlýn je dezintegrační zařízení, ve kterém dochází k jemnému mletí materiálu v bubnu. Kulové mletí je proces využívající média ve válcové nádobě, na jehož výstupu získáme jemný prášek požadované velikosti daného materiálu. Buben je rotační válcová, výjimečně kuželová, nádoba naplněná mlecími elementy, koulemi a mletým materiálem neboli melivem. Buben se otáčí kolem své osy a koule, zvedané nahoru díky třecí a odstředivé síle, dopadají do meliva, které je rozpojováno na menší částice drcením i otěrem – třením (Obr. 8).



Obr. 8 Základní způsoby rozpojování materiálu v kulových mlýnech [21]

1 – drcením, 2 – třením

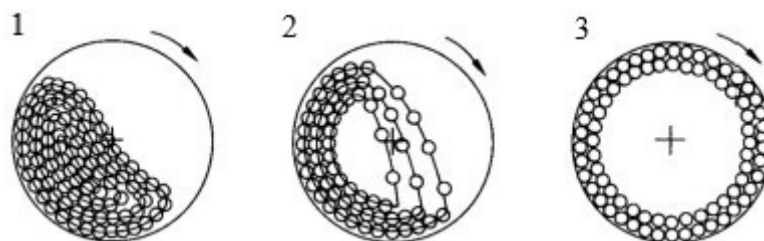
Jemnost zrna závisí především na tom, kolikrát se zrno dostane do kontaktu s mlecími koulemi, to je možno řídit časem mletí. Účinnost mletí je nejvíce ovlivňována výškou, ze které koule dopadají. Závisí převážně na rychlosti otáčení n a průměru bubnu D , dále také na energii, velikosti a množství mlecích elementů v bubnu. Energeticky i časově nejlepší výsledky se získají při optimální rychlosti otáčení, která odpovídá $1/2$ až $2/3$ kritické rychlosti otáčení. [16, 27–30]

$$n_{kr} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

Kde značí: n_{kr} kritická rychlost otáčení [min^{-1}]

D průměr bubnu [mm]

Rozlišujeme tři základní typy pohybu mlecích koulí (Obr. 9) v závislosti na otáčkách:



Obr. 9 Základní typy pohybu mlecích koulí [17]

1 – kaskádový (peřejový), 2 – vodopádový (kataraktní), 3 – rotační (setrvačnickový)

Prvním typem je kaskádový (peřejový) pohyb. Nastává, když je rychlost otáčení bubnu nižší a odstředivá s třecí silou mají menší účinek než gravitační síla. Koule kaskádovitě padají, přealují se z horní části bubnu dolů. Dochází k odvalování a materiál je rozpojován především otěrem.

$$n = \frac{24}{\sqrt{D}} \quad (2)$$

Kde značí: n rychlost otáčení [min^{-1}]

Druhým typem je vodopádový (kataraktní) pohyb. Nastává, právě když je rychlost otáčení bubnu rovna optimální rychlosti otáčení, tedy je vyšší než pro kaskádový pohyb, ale pod kritickou rychlostí otáčení. Koule je unášena až do výšky, kdy překoná úhel pro odpoutání, cca $54^{\circ}40'$, poté koule padá zpět dolů po parabolické dráze. V tomto případě nastává mletí drcením i otěrem a z těchto tří typů pohybu je neúčinnější.

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}} \quad (3)$$

Třetím typem je rotační (setrvačnickový) pohyb. Nastává při rychlosti otáčení bubnu vyšší než kritické. Odstředivá síla má větší účinek než gravitační síla. Koule je unášena celou dobu a nedojde k odpoutání. V tomto případě mletí nenastává, případně je minimální, a to pouze otěrem. [18, 31]

Produktivitu kromě rychlosti otáčení ovlivňuje také několik dalších faktorů, jako přidání kapaliny, plnění, kontinuita procesu a materiál.

Mlít je možno klasicky za sucha, bez přidané kapaliny, ale i za mokra, s přidáním kapaliny, buď pro získání disperze, nebo jemnějších zrn. [28]

Plnění bývá 2/3 objemu bubnu. Při mokřém mletí jsou obvykle melivo, mlecí tělesa a kapalina ve stejném poměru. Při suchém mletí je nutný správný poměr meliva a mlecích těles, aby nedocházelo k nadměrnému opotřebení při malém podílu meliva a zároveň se nesnižovala účinnost při velkém podílu meliva. [18] Podíl mlecích těles by neměl přesáhnout 30 % až 35 % objemu bubnu. Je nevhodné používat mlýn jinak než při plné kapacitě, jelikož při mletí naprázdno se spotřebuje téměř stejná energie. [20]

Kulové mlýny rozdělujeme podle konstrukce, tvaru a rozměrů na bubnové, válcové a kuželové. Rozlišují se periodicky pracující, které se naplní, následuje cyklus mletí a poté je nutné je vyprázdnit, a kontinuální, kde plnění, mletí a vyprazdňování probíhá nepřetržitě. Oddělení materiálu od mlecích koulí u kontinuálního procesu probíhá buď po celém obvodu skrze válcová síta, nebo dutým čepem v čele nádoby, u periodicky pracujícího se po dokončení cyklu materiál oddělí přes síta mimo buben. [18, 20, 32]

1.5.2. Mlecí nádoba

Při volbě materiálu mlecích nádob, jejich vyložení a mlecích těles je zásadním kritériem tvrdost meliva. Nutné je, aby mlecí nádoby a tělesa byly tvrdší než mletý materiál. Mlecí tělesa jsou nejčastěji koule z nerezové oceli, např. dobře tvárné a houževnaté manganové oceli, nebo keramiky, ale také ze stealitu, případně lze použít i křemenných oblázků. Mechanické vlastnosti těchto materiálů zásadně ovlivňují životnost koulí. V laboratořích se často používají v kombinaci porcelánové nádoby (Obr. 10) s korundovými tělesy, případně porcelánovými, z leštěného achátu a v poslední době i karbidu wolframu a kobaltu. Velké mlýny jsou zkonstruovány z nerezové oceli a vyloženy steatitem, korundem nebo porcelánem. Problémem při nesprávném zvolení materiálu je nadměrné opotřebení i případná kontaminace meliva, což je nepřijatelné například ve farmaceutickém průmyslu. Pro předjetí těmto problémům je možné volit vyložení plastem, pryží nebo polyuretanem, případně celý buben zhotovit z porcelánu, podobně jako u malých laboratorních mlýnů. [26, 30, 32, 33]



Obr. 10 Porcelánový mlýn kulový s víkem, uzávěrem a těsněním [34]

Obr. 11 Porcelánové mlecí koule různých průměrů [35]

Průměr mlecích koulí se volí na základě velikosti mletých zrn, pro větší zrna je zapotřebí větší průměr koulí. U větších průměrů koulí při dopadu působí větší síla, mající vliv na rozpojení drcením. Malé průměry koulí jsou výhodné využít v případě, kdy už jsou zrna jemnější a potřebujeme větší mlecí povrch, tehdy dochází převážně k otěru. Z těchto důvodů se v praxi využívá různých průměrů koulí v jedné dávce zajišťujících lepší rozemletí všech velikostí zrn v průběhu mletí (Obr. 11). [18, 33]

Mezi výhody kulových mlýnů se řadí:

- možnost využití v širokém spektru průmyslu
- vysoká kapacita
- spolehlivost a snadná údržba

Mezi nevýhody kulových mlýnů se řadí:

- energetická náročnost, většina energie při mletí se spotřebovává vzájemným otěrem mlecích těles a nádoby a zahříváním meliva
- hlučnost procesu [20]

Hlavními parametry ovlivňujícími výsledek mletí pro daný materiál jsou:

- typ mlýna, případně mlecí nádoba
- energie a rychlost mletí
- čas mletí
- typ, velikost a rozdělení velikosti mlecího média
- poměr hmotnosti kuličky a prášku
- poměr naplnění nádoby
- teplota při mletí (lze využít například mletí za nízkých teplot – kryomletí)

Jednotlivé parametry jsou často na sobě vzájemně závislé, tzn. ze změny jednoho parametru vyplývá změna jiného. Například při snížení rychlosti je pro stejný účinek potřeba zvýšit čas. [36]

2. Koncepční návrh mlecího zařízení

Na základě realizované podrobné rešerše vznikly následující konstrukční návrhy, které odpovídají požadavkům zařízení. Základním prvkem je pohon, který je volen na základě dostupných strojních komponent na pracovišti KSR. Další důležitá komponenta je mlecí buben/nádoba, která s ohledem na využití bude vyměnitelná. Předložené koncepční návrhy uvažují s velikostí mlecí nádoby 1,3 a 6 litrů. V této práci je použit porcelánový mlýn kulový s víkem, uzávěrem a těsněním. Pro pohon dané mlecí nádoby je vhodné využít soustavu hnacího a hnaného hřídele, na kterou se nádoba položí a není ji nutné na zařízení složitě upínat a jistit. Značná variabilita však zůstává při návrhu převodu. Lze uvažovat hned nad několika konstrukčními uspořádáními, kde každé má své výhody i nevýhody, které jsou popsány detailněji u konkrétních návrhů převodů.

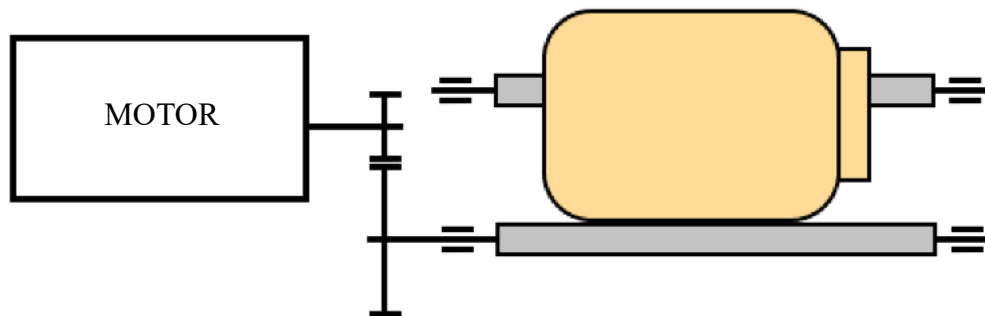
Společná výhoda těchto vybraných návrhů je možnost regulace otáček převodem a s tím spojené zvýšení krouticího momentu. Navýšení krouticího momentu je zvláště výhodné při regulaci motoru frekvenčním měničem. Při použití frekvenčního měniče klesá výkon motoru a s ním i krouticí moment.

2.1. Pohon mlecího zařízení

2.1.1. Převod čelními ozubenými koly

Výhodou zařízení s převodem čelními ozubenými koly (Obr. 12) je velká účinnost, vysoká spolehlivost a dlouhá životnost převodu. Tento převod zajišťuje stálý převodový poměr.

Nevýhodou je nutnost přesné výroby a montáže. Dále se tento převod musí mazat, jinak dochází ke zvýšení tření a tím vzniku tepla, nadměrnému opotřebení, a vyšší hlučnosti.

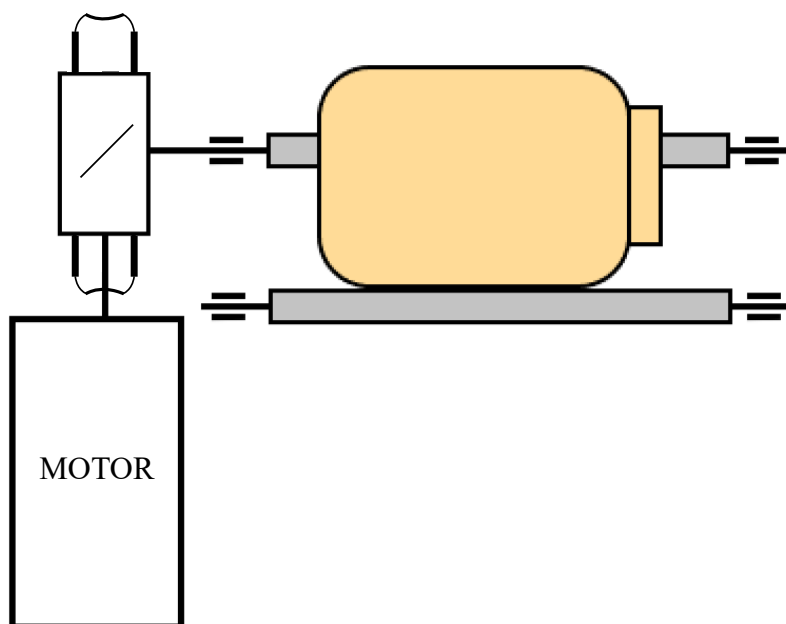


Obr. 12 Schéma zařízení s převodem čelními ozubenými koly

2.1.2. Převod šnekovým soukolím

Výhodou konstrukčního řešení zařízení s převodem šnekovým soukolím (Obr. 13) je úspora místa. Osa motoru je kolmá na osy hřídelů. Hlavním znakem šnekového soukolí z hlediska převodu je možnost dosáhnout vysokého převodového poměru. Tento převod také zajišťuje stálý převodový poměr.

Nevýhodou je nižší účinnost oproti jiným ozubeným převodům. Dále jsou vyšší požadavky na uložení a nutnost zachytit axiální síly v ložiskách. Tento převod je také nutné mazat.

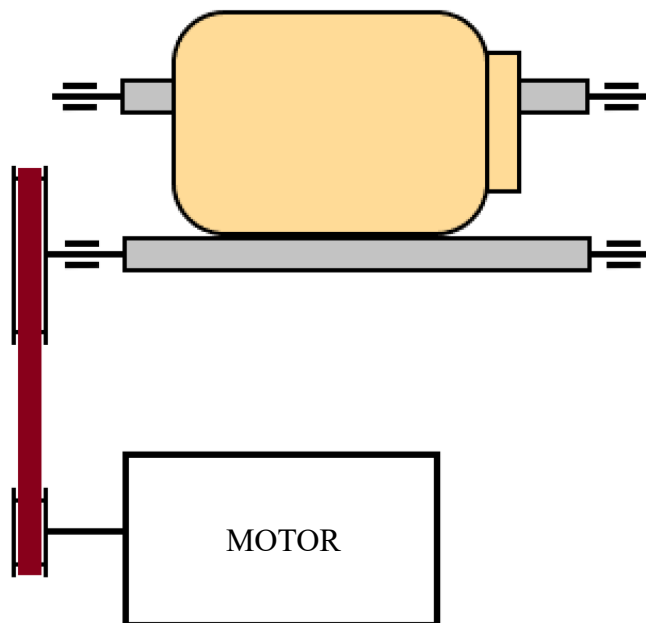


Obr. 13 Schéma zařízení s převodem šnekovým soukolím

2.1.3. Převod řemenem

Výhodou konstrukčního řešení zařízení s převodem řemenem (Obr. 14) je nízká cena a snadná montáž bez požadavků na velmi přesné uložení. Další velmi příznivou vlastností je tlumení rázů a plynulý chod řemene.

Nevýhodou je prokluz řemene a nutnost odsadit motor od hřídele o hodnotu osové vzdálenosti řemenic. Řemen je nutné předeprnout.



Obr. 14 Schéma zařízení s převodem řemenem

2.2. Válcce

Při návrhu hnacích válců se naskytují 2 základní koncepty, kde se nabízejí varianty válce v celku s nebo bez povrchové úpravy a válce tvořeného segmenty.

2.2.1. Válec v celku

První varianta ocelového válce v celku odpovídá průmyslově vyráběným hladkým ocelovým válečkům upravených nátěrem. Tyto válce lze použít jak na nepoháněné, tak poháněné válečkové tratě. Na koncích je opatřený osazením pro uchycení do ložisek. Pro získání lepších přenosových vlastností je vhodné po celé délce opatřit válec několika drážkami pro o-kroužek. Výhodou tohoto řešení je tuhost válce a dobrá dostupnost i případná výroba. Nevýhodou je případná nutnost válec opatřit drážkami.

Druhou variantou je využití poháněcích válců z dopravníkových válcových tratí (Obr. 16). Tyto válce jsou často pogumovány (Obr. 15), což zvyšuje účinnost převodu. Oproti válcům s drážkami pro o-kroužek není nutné zhotovení drážek a lze výrobcem dodaný válec rovnou použít. Výhodou tohoto řešení je tuhost válce a dobrá dostupnost bez nutnosti dalších úprav.



Obr. 15 Dopravníkový válec pogumovaný

Obr. 16 Dopravníkový válec ocelový

2.2.2. Válec tvořený segmenty

Toto řešení je analogií k průmyslově vyráběným diskovým a kotoučovým válečkům, využívaných v místech dopadu dopravovaného materiálu. Kotouče se dodávají gumové nebo polyuretanové.

Válec je tvořen ocelovou tyčí a segmenty (Obr. 17). Segmenty s drážkou pro o-kroužek a závitem pro dotažení šroubem na tyč, lze pro úsporu zhotovit z plastu. Výhodou tohoto řešení je úspora materiálu při výrobě a značné snížení hmotnosti, na rozdíl od válců v celku, a snadné

zhotovení na pracovišti katedry. Dalšími výhodami jsou možnost měnit převodový poměr změnou průměru segmentu a vzdálenosti hnacích segmentů i dorazů v závislosti na velikosti mlecí nádoby a jejím nerovnostem.



Obr. 17 Válec tvořený segmenty [40]

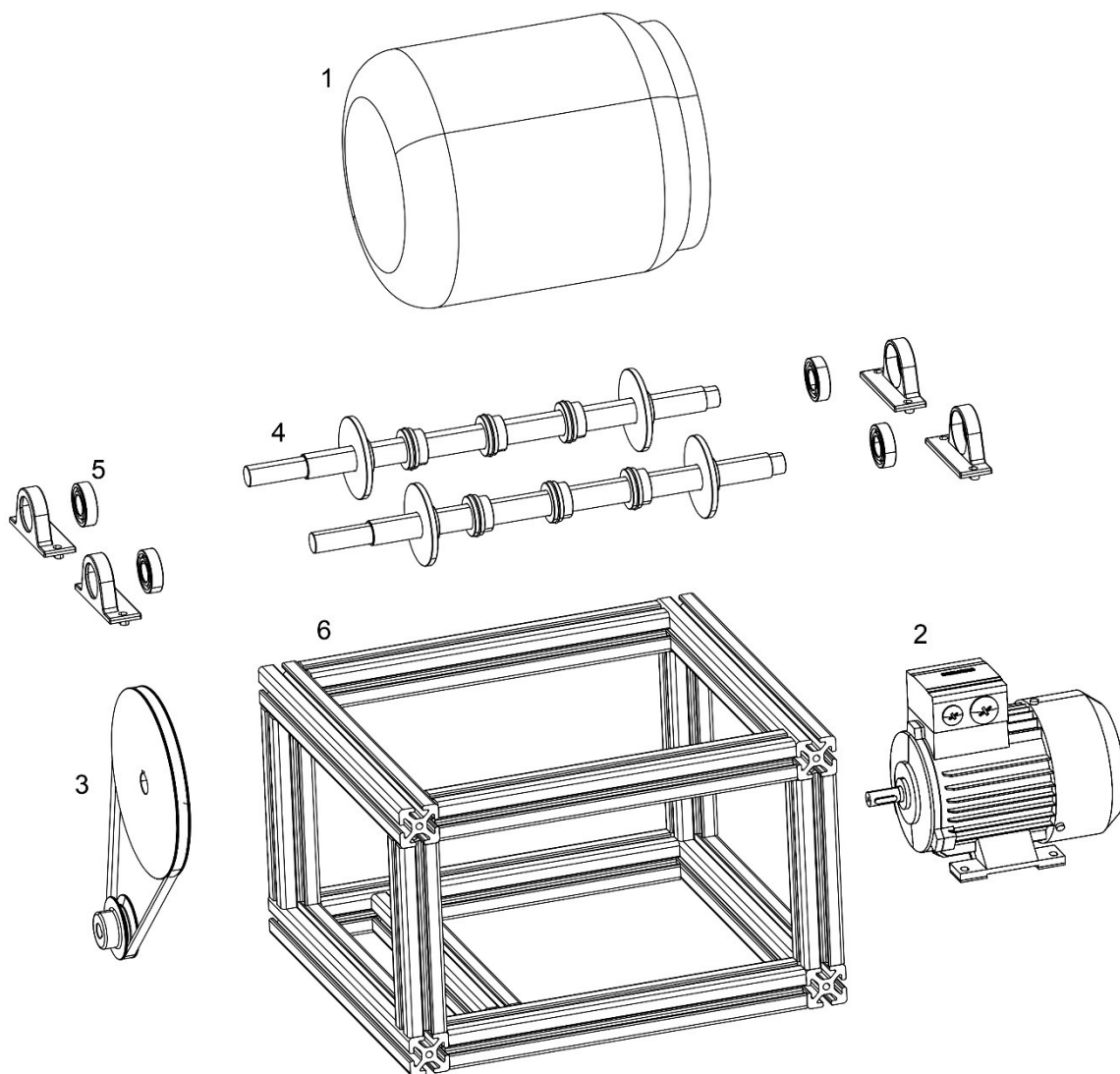
2.3. Výsledná varianta

S ohledem na prostorové konstrukční uspořádání a relativně jednoduchou bezproblémovou montáž navrhovaného mlecího zařízení a dále s ohledem na funkci převodu a jeho výrobní náklady je jako výsledná zvolena varianta s řemenovým převodem. Motor je umístěn pod soustavou hnacího a hnaného hřídele což je žádoucí z hlediska krytování celého zařízení vzhledem k prašnosti mletého materiálu.

S ohledem na požadavek změny velikosti mlecí nádoby je volena jako výsledná varianta válce tvořeného segmenty. To nabízí možnost změny převodového poměru a vzdálenosti hnacích segmentů i dorazů. Z hlediska výroby dojde k úspoře materiálu při výrobě a snížení hmotnosti.

3. Konstrukční řešení mlecího zařízení

Zařízení se skládá z rámu, který tvoří základ konstrukce. K pohonu slouží motor, uchycený šrouby v patkách na rám. Krouticí moment je z motoru přenášen na hnací hřídel pomocí řemene. Hřídele jsou uchyceny ložisky v ložiskových domcích upevněných šroubovými spoji na rám a jsou osazeny dorazovými a hnacími disky pro zajištění a pohon mlecího bubnu. Hlavní části zařízení pro mletí recyklovaného skla jsou znázorněny níže (Obr. 18).



Obr. 18 Návrh konstrukčního řešení, pohled na zařízení rozložené na jednotlivé části

1 – mlecí nádoba, 2 – pohon, 3 – převod, 4 – válce, 5 – ložiska s ložiskovými domky, 6 – rám

Návrh celé konstrukce vychází z výstupní rychlosti otáčení motoru a z optimální rychlosti otáčení mlecího bubnu. Celkový převodový poměr je dán průměrem bubnu a průměrem válce, který pohání buben, a převodovým poměrem řemene.

Celkový převodový poměr mlecího zařízení:

$$i = \frac{n_1}{n_2} \quad (4)$$

Kde značí n_1 rychlost otáčení vstupní [min^{-1}]
 n_2 rychlost otáčení výstupní [min^{-1}]

Převodový poměr z válce na buben:

$$i_{vb} = \frac{D}{D_v} = 6,25 \quad (5)$$

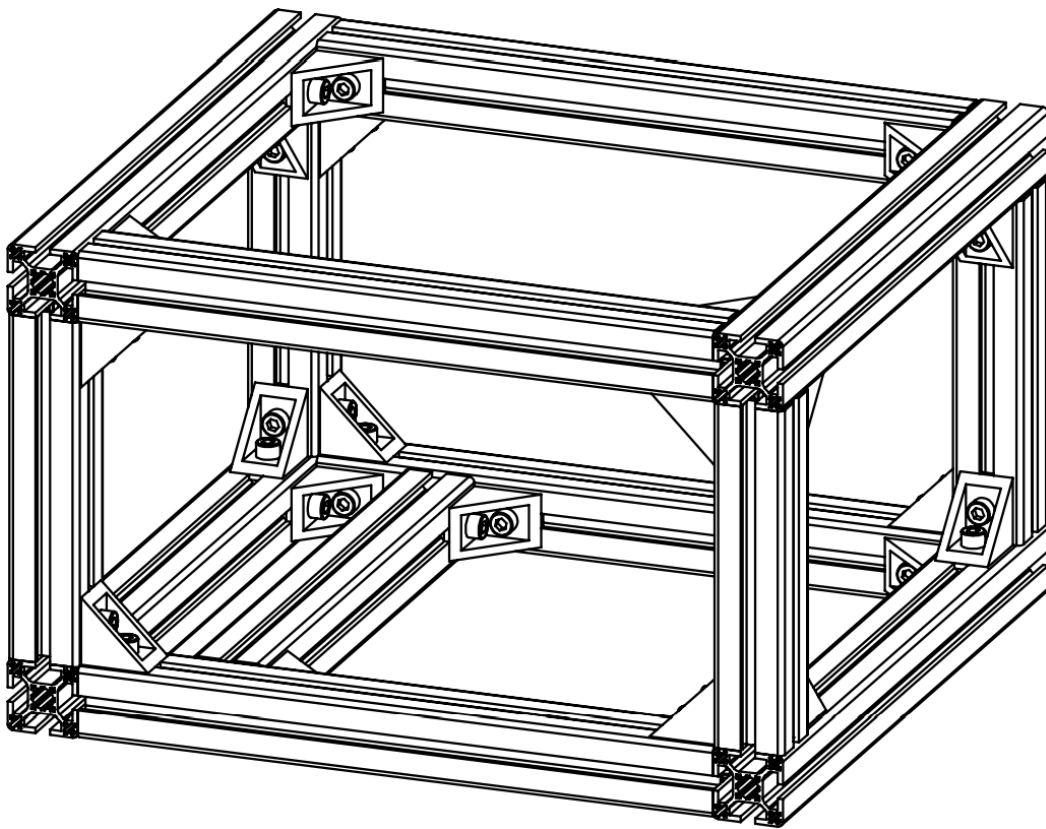
Celkový převodový poměr mlecího zařízení:

$$i = i_{vb} * i_{\dot{r}} \quad (6)$$

Z čehož zbývá vypočítat převodový poměr řemenu ($i_{\dot{r}}$) pro návrh řemenového převodu. Po volbě válců, na kterých se bude otáčet mlecí nádoba je nutné vybrat ložiska s ložiskovými domky. Zvolená ložiska jsou kontrolována dle zatížení. Vše bude uchyceno na nosný rám a některé části zakrytovány. Na konci konstrukční části se krytem zakrytuje řemen s řemenicemi, případně i motor.

3.1. Nosný rám

Konstrukční řešení nosného rámu bylo voleno s ohledem na skladové zásoby a výrobní možnosti pracoviště. Na rám byly použity Al profily. Výhodou tohoto řešení oproti svařovanému rámu je modulovatelnost, snadná manipulace a montáž bez nutnosti převážet rám v celku a možnost zařízení v budoucnu poupravovat dle potřeb. Rám (Obr. 19) je tvořen z duralových extrudovaných profilů spojených úhelníky, šrouby a profilovými maticemi.



Obr. 19 Rám

3.2. Nádoba s mlecími kuličkami

S ohledem na požadované množství namletého prášku je k dispozici jedna větší nádoba velikosti 6 l a jedna menší velikosti 1,3 l (Obr. 20). Dále budou využívány mlecí porcelánové koule velikosti 30–50 mm.

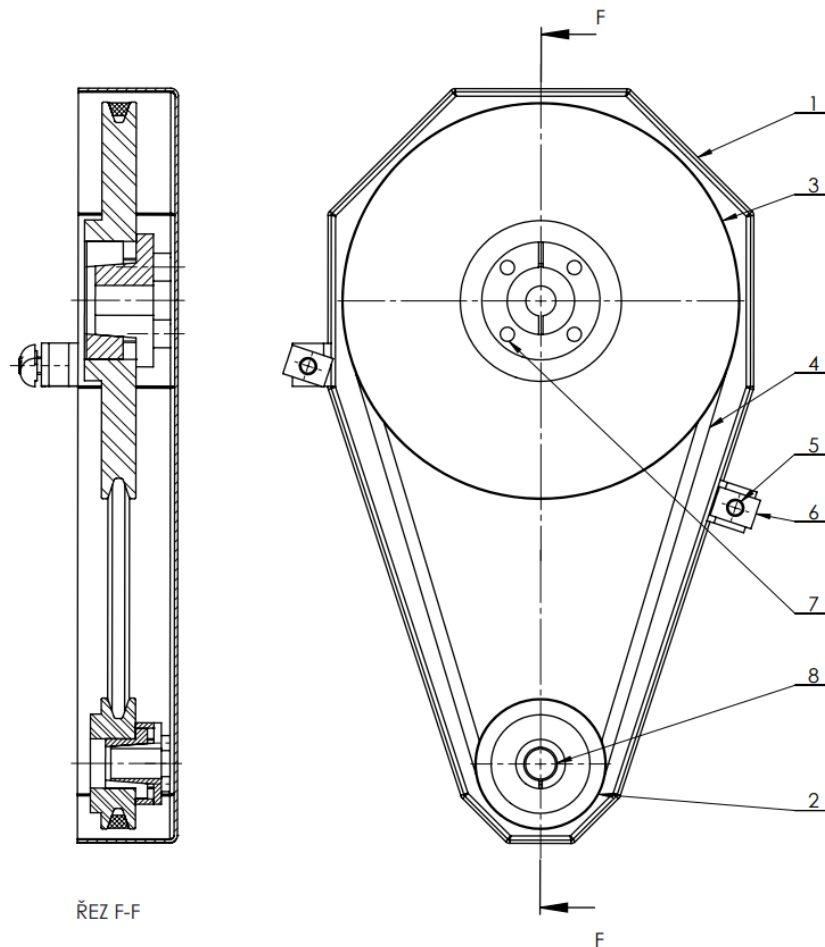


Obr. 20 Porcelánový mlýn kulový 6 l (vlevo) a 1,3 l (vpravo) s porcelánovými mlecími koulemi různých průměrů a skelnou drtí.

3.3. Pohon s řemenovým převodem

Pohon mlecího zařízení je řešen prostřednictvím elektromotoru s frekvenčním měničem a řemenového převodu (Obr. 21).

Krouticí moment lze přenášet z řemenice na hřídel pomocí pera. Toto spojení, při dostatečné délce pera, či při použití více per, zaručuje přenos krouticího momentu. S ohledem na výrobní možnosti dílny pracoviště KSR, která nemá potřebné zařízení pro výrobu drážky pro pero v náboji, jeví se možnost výroby náboje bez drážky a následné použití svěrného pouzdra. Hlavní předností svěrného pouzdra je jednoduchost, jak na výrobu náboje s hřídelem, tak na montáž. Dále se jedná o levný a pohodlný způsob montáže, který neklade příliš vysoké nároky na přesnost hřídele a umožňuje jemné polohování na hřídeli, kde není potřeba osazení. Pro hnaný hřídel bylo použito pouzdro z řady RCK 15 s označením KLBB 114. Spojení hnací řemenice s výstupním hřídelem motoru bylo realizováno pouzdrem typu RCK 80 s označením KLCC 14. Bylo nutné použít pouzdro s menším vnějším průměrem, než nabízí řada RCK 15.



Obr. 21 Schéma konstrukčního řešení podsestavy převodu řemenem

1 – kryt řemene, 2 – hnací řemenice, 3 – hnaná řemenice, 4 – řemen, 5 – šroub, 6 – matice, 7 – KLBB 114, 8 – KLCC 14

3.3.1. Elektromotor s frekvenčním měničem

Vzhledem ke skladovým zásobám bude použit asynchronní motor Siemens 1LA7070-4AB10 (Obr. 22). Štítkové hodnoty (Obr. 23) při napájení ze sítě 50 Hz jsou

$$P_r = 250 \text{ W}$$

$$n_m = 1350 \text{ min}^{-1}$$

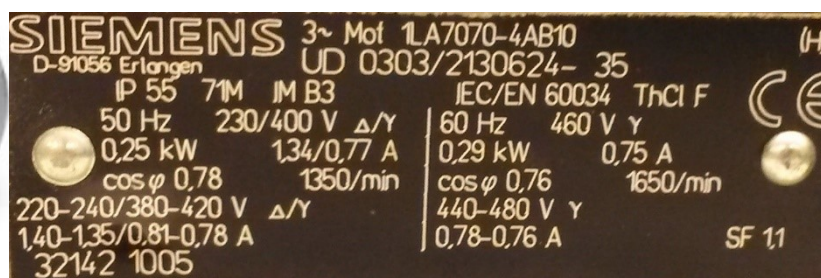
$$M_k = 1,8 \text{ Nm}$$

Kde značí	P_r	výkon elektromotoru [W]
	n_m	jmenovitá rychlost otáčení motoru [min^{-1}]
	M_k	jmenovitý moment motoru [Nm]

22



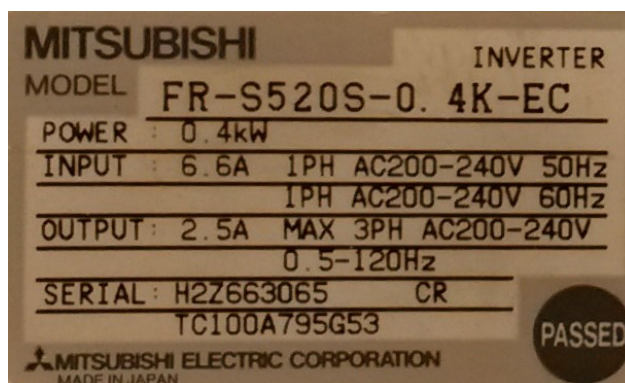
23



Obr. 22 Motor Siemens 1LA7070-4AB10 [37]

Obr. 23 Štítkové hodnoty motoru Siemens 1LA7070-4AB10

Výrobce uvádí možnost napájet a provozovat motory typu 1LA7 frekvenčními měniči. Opět s ohledem na skladové zásoby bude využit frekvenční měnič FR-S520S-0.4 K-EC (Obr. 24). Tento měnič umožňuje změnu kmitočtu a tím je možné plynule regulovat rychlost otáčení. V případě kulového mlýna bude frekvenční měnič využit ke snižování rychlosti otáčení. Při použití motoru s frekvenčním měničem motor nedosahuje jmenovitých hodnot výkonu, ale hodnot nižších. Z tohoto důvodu je příhodné využít ke snížení rychlosti otáčení i mechanický převod, kde se na rozdíl od frekvenčního měniče při snižování rychlosti otáčení zvyšuje krouticí moment. [38]



Obr. 24 Štítkové hodnoty frekvenčního měniče FR-S520S-0.4 K-EC

3.3.2. Elektronika a ovládání zařízení

Jednotlivé komponenty, tedy motor, frekvenční měnič a časovač, umožňující nastavení času mletí bez nutné přítomnosti obsluhy, budou zapojeny společně s hlavním vypínačem. Z hlediska bezpečnosti je vhodné veškeré ovládací komponenty umístit do elektrorozvaděče zamezující volný přístup. Nakonec je nutné provést revizi zařízení.

3.3.3. Návrh řemenového převodu a volba řemene

Hnací stroj: Elektromotor

$$P_{re} = 250 \text{ W}$$

$$n_m = 1350 \text{ min}^{-1}$$

Poháněný stroj: Válec mlecího bubnu, rychlost otáčení válce

$$n_v = 422 \text{ min}^{-1}$$

Provoz: 24 h několikrát do týdne

Přibližná osová vzdálenost:

$$a = 200 \text{ mm}$$

Způsob napínání řemene: Posuv motoru

Vzhledem ke způsobu využití převodu a zatížení je volen lehký provoz, nad 16 h/den

Viz katalogový list: [39]

Provozní faktor:

$$C_2 = 1,2$$

Návrhový výkon:

$$P_d = P_r * C_2 = 250 * 1,2 = 300 \text{ W} \quad (7)$$

Průřez řemenu:

S ohledem na rychlost otáčení a nízké zátěži je volen klasický průřez Z

Převodový poměr řemenu: volen pomocí MATLAB s cílem dosažení optimálního výsledku, kde hlavním vstupním parametrem byl optimální celkový převodový poměr mlecího zařízení při různých průměrech mlecích nádob.

$$i_{\bar{r}} = 3,2$$

Vztažné průměry řemenic: průměr hnací řemenice

$$d_{\bar{r}} = 56 \text{ mm}$$

Průměr hnané řemenice:

$$D_{\bar{r}} = 180 \text{ mm}$$

Na základě výpočtu byl stanoven tento typ řemenu: Řemen 10x800 Li Z 31,5 CONTI-V společnosti TYMA CZ, s.r.o.

Délka řemenu:

$$L_d = 820 \text{ mm}$$

Napínání řemenu bude prováděno posuvem motoru, kdy osová vzdálenost bude stavitelná.

Minimální návrhová osová vzdálenost:

$$CC_{p\ min} = 0,7(D_{\check{r}} + d_{\check{r}}) = 170,52\ mm \quad (8)$$

Maximální návrhová osová vzdálenost:

$$CC_{p\ max} = 2(D_{\check{r}} + d_{\check{r}}) = 487,2\ mm \quad (9)$$

Osová vzdálenost: dle délky řemenu

$$CC = 216\ mm$$

Osová vzdálenost vyhovuje požadavku

$$CC_{p\ min} < CC < CC_{p\ max}$$

Základní jmenovitý výkon řemene:

$$P_z = 0,67\ kW$$

Jmenovitý výkon řemene stanovený na základě převodového poměru:

$$P_i = 0,1\ kW$$

Celkový základní jmenovitý výkon řemene:

$$P_b = P_z + P_i = 0,67 + 0,1 = 0,77\ kW \quad (10)$$

Opravný součinitel délky řemenu:

$$C_1 = 0,99$$

Opravný součinitel úhlu opásání:

$$C_3 = 0,92$$

Jmenovitý výkon řemene:

$$P_r = P_b * C_1 * C_3 = 0,77 * 0,99 * 0,92 = 0,7\ kW \quad (11)$$

Počet řemenů:

$$N_{\check{r}} = \frac{P_d}{P_r} = \frac{0,3}{0,7} = 0,43 \quad (12)$$

$$N_{\check{r}} = 1$$

Přídavek na montáž:

$$MIA = 15$$

Přídavek na napínání:

$$MTA = 25$$

Minimální osová vzdálenost:

$$CC_{min} = CC - MIA = 201\ mm \quad (13)$$

Maximální osová vzdálenost:

$$CC_{max} = CC + MTA = 241\ mm \quad (14)$$

3.3.4. Silové výpočty řemenu

Úhel opásání malé řemenice:

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{D_{\dot{r}} - d_{\dot{r}}}{2CC} \quad (15)$$

$$\frac{\beta}{2} = \arcsin\left(\frac{D_{\dot{r}} - d_{\dot{r}}}{2CC}\right) = 17,18^\circ \quad (16)$$

Úhel sklonu řemene:

$$\alpha_1 = 180 - 2 * \frac{\beta}{2} = 145,7^\circ \quad (17)$$

Užitečná obvodová síla:

$$F = \frac{2M_{k1}}{d_{\dot{r}}} = 52,76 \text{ N} \quad (18)$$

Tření v klínové drážce řemenice:

$$f_k = \frac{f}{\sin \varphi} = \frac{0,3}{\sin 20^\circ} = 0,877 \quad (19)$$

Potřebné předpětí řemene:

$$F_0 = \frac{F e^{f_k \alpha_1} + 1}{2 e^{f_k \alpha_1} - 1} = 32,74 \text{ N} \quad (20)$$

Největší síla v řemeni:

$$F_{v1} = F \frac{e^{f_k \alpha_1}}{e^{f_k \alpha_1} - 1} = 59,12 \text{ N} \quad (21)$$

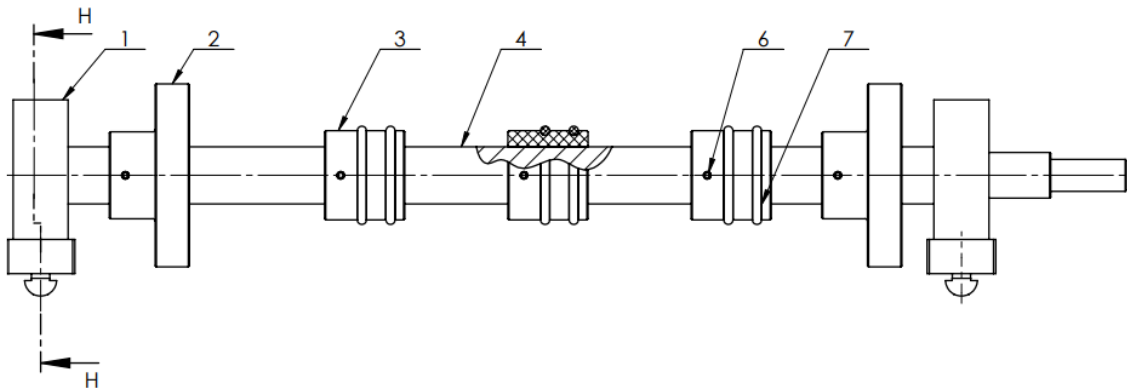
Síla působící na hřídel:

$$F_{vr} = 2 * \frac{M_k}{d_{\dot{r}}} = 52,76 \text{ N} \quad (22)$$

3.4. Hnací a hnaný válec

Základem válce je hřídel uložená v ložiskách, osazená segmenty (Obr. 25). Hřídel byla navržena opět s ohledem na skladové zásoby, byla volena tyč Ø25h8 zajišťující dostatečnou tuhost válce. Byla provedena pevnostní kontrola v návrháři komponent Autodesk Inventor.

Každý válec je tvořen pěti segmenty, materiál segmentů je volen polyamid PA66. Dva segmenty jsou dorazy, které zabraňují vypadnutí nádoby z mlecího zařízení v axiálním směru. Každý ze tří hnacích segmentů je opatřen párem o-kroužků, které slouží pro přenos momentu z hřídele na buben. Válců v ložiskových domcích nabízejí možnost změny rozteče segmentů v závislosti na velikosti mlecí nádoby. Rozteč válců je snadno nastavitelná povolením 4 šroubů v ložiskových domcích, posuvem hřídele a opětovným dotažením šroubů pro zajištění polohy.



Obr. 25 Schéma konstrukčního řešení uložení válce tvořeného segmenty

1 – ložiskový domek s ložiskem, 2 – doraz, 3 – hnací segment, 4 – hřídel, 6 – šroub, 7 – o-kroužek

3.4.1. Optimální rozteč válců (hřídelí)

Optimální rozteč hnací a hnané hřídele vychází z teoretického rozboru dané situace (Obr. 26). Výpočtové schéma je provedeno pro dvě varianty, tj. pro ideální a reálný případ. U mlecí nádoby je zapotřebí docílit jejího plynulého odvalování, aby nedocházelo k jejímu prosmekávání. V případě menší roztečné vzdálenosti hnacího a hnaného hřídele může dojít k překlopení mlecí nádoby, a naopak v případě větší roztečné vzdálenosti obou hřídelů bude docházet k prosmekávání, tj. nádoba se nebude plynule odvalovat.

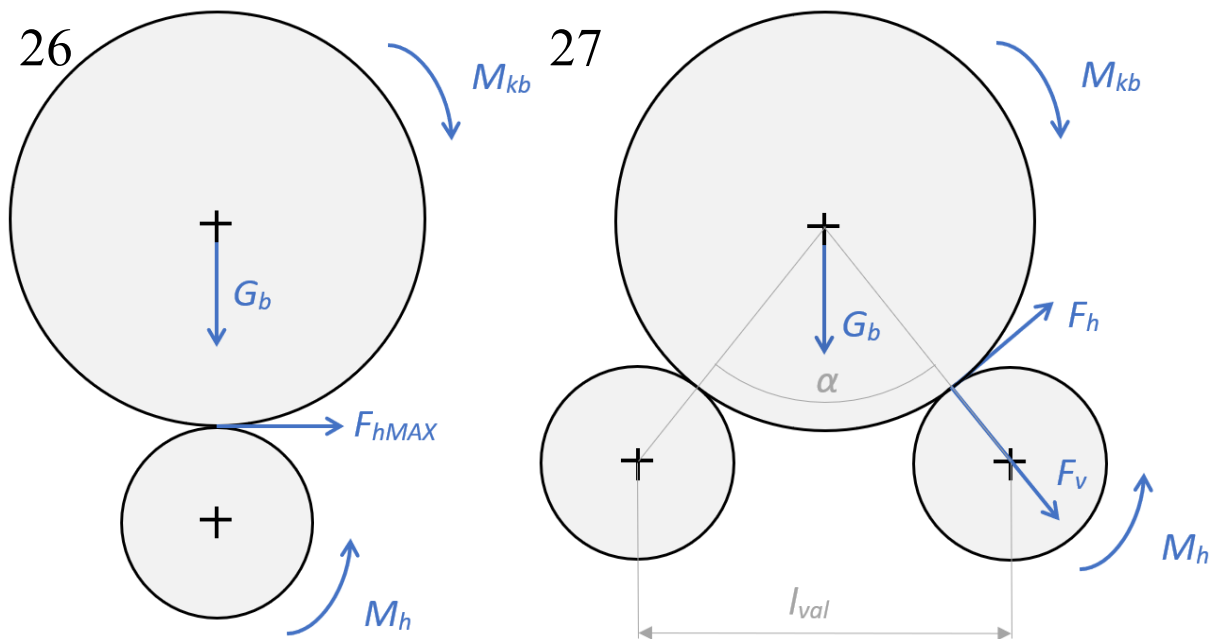
- a) Ideální případ z pohledu přenosu krouticího momentu. Hnací hřídel je umístěn přímo v těžišti mlecí nádoby, třecí síla je maximální, dochází k přenosu maximálního krouticího momentu.
- b) Reálný případ z pohledu přenosu krouticího momentu. Hnací a hnaný váleček je umístěn v určitém úhlu rozevření, velikost optimálního úhlu (60°) byla konfrontována s odbornou literaturou, s rostoucím úhlem rozevření se snižuje velikost třecí síly. V případě úhlu rozevření 180° je třecí síla nulová. Ve skutečnosti je třecí síla funkcí gravitační síly působící od mlecí nádoby a třecího koeficientu mezi keramickou mlecí nádobou a materiálem pryže (O kroužku NBR 70Sh).

Na základě realizovaných experimentů lze předpokládat třecí koeficient f 0,3 až 0,5. Tabulkové hodnoty třecího součinitele vybraných materiálů:

- guma-náledí 0,1-0,2
- guma-dlaždice 0,4-0,6
- guma-asfalt 0,6

Na základě realizovaných experimentů a rešerše je dále v práci uvažována hodnota třecího koeficientu mezi keramickou mlecí nádobou a pryží $f = 0,4$.

A dále je proveden kontrolní výpočet na stabilitu mlecí nádoby, který vychází z reálné varianty umístění mlecí nádoby na hnací a hnané hřídeli (Obr. 27). Je zde nastíněn výpočet síly, která způsobí překlopení (převrhnutí) mlecí nádoby.



Obr. 26 Schéma válce s bubnem, ideální případ z pohledu přenosu krouticího momentu M_k
Obr. 27 Schéma válce s bubnem, reálný případ z pohledu přenosu krouticího momentu M_k

Kde značí F_{hmax} maximální síla vyhazující buben
 M_{kb} krouticí moment na bubnu

Hmotnost mlecího bubnu:

$$m_b = 22 \text{ kg}$$

Tíhová síla bubnu:

$$G_b = m_b * g = 215,82 \text{ kN} \quad (23)$$

Vzdálenost válců vycházející z konstrukce pro optimální úhel:

$$l_{val} = 145 \text{ mm}$$

Výpočet úhlu rozevření při změně osové vzdálenosti:

$$\alpha = \arccos \frac{l_{val}}{D + D_v} \quad (24)$$

Ve výpočtech uvažován optimální úhel rozevření:

$$\alpha = 60^\circ$$

Síla působící z bubnu na válec:

$$F_v = \frac{G_b}{\sin \alpha} = 249,2 \text{ N} \quad (25)$$

Síla působící z bubnu na válec ve směru x:

$$F_{vx} = F_v * \cos \alpha = 124,6 \text{ N} \quad (26)$$

Síla pro překlopení:

$$F_p = \frac{F_{vx}}{\sin \alpha} = 143,9 \text{ N} \quad (27)$$

Krouticí moment na válci:

$$M_h = i_{\ddot{r}} * M_k = 5,76 \text{ Nm} \quad (28)$$

Síla vyhazující buben:

$$F_h = f * i_{\ddot{r}} * \frac{M_k}{D_v/2} = 115,2 \text{ N} \quad (29)$$

Jedná se o zjednodušený výpočet bez uvažování odvalování nádoby a válečku po sobě.

3.4.2. Ložiska SKF

Voleny z katalogu dle rozměrů, kontrolovány výpočtem na životnost.

Ložisko 6004-2RSH ČSN 02 4633

Vnitřní průměr ložiska:

$$d_l = 20 \text{ mm}$$

Vnější průměr ložiska:

$$D_l = 42 \text{ mm}$$

Šířka ložiska:

$$B_l = 12 \text{ mm}$$

Poloměr zaoblení ložiska:

$$r_l = 1 \text{ mm}$$

Základní únosnost ložiska dynamická:

$$C_l = 9,95 \text{ kN}$$

Základní únosnost ložiska statická:

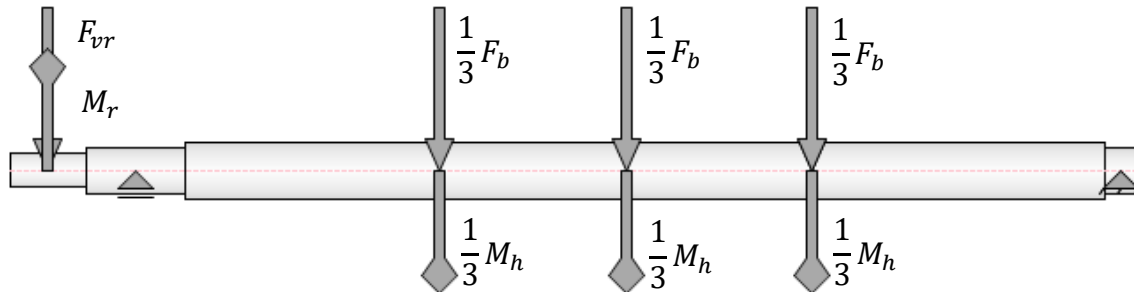
$$C_{0l} = 5 \text{ kN}$$

Hmotnost ložiska:

$$m_l = 0,067 \text{ kg}$$

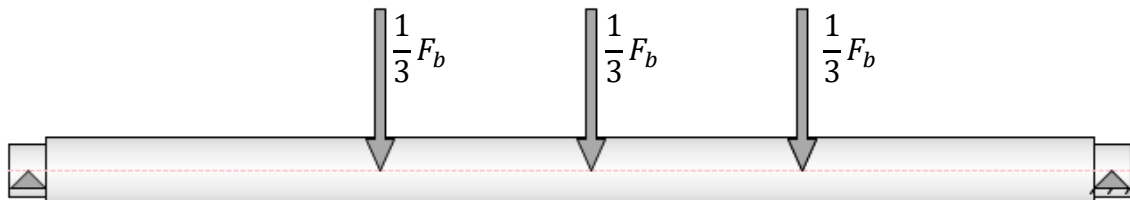
3.4.3. Výpočet trvanlivosti ložisek

Při výpočtu reakcí v ložiskách hřídele 1 (Obr. 28) bylo uvažováno se zatížením od řemenového převodu a od bubnu, kde je možnost odskočení bubnu, což způsobí maximální zatížení hřídele, přičemž hřídel 2 je nezatížená. Obdobně byl proveden výpočet hřídele 2 (Obr. 29).



Obr. 28 Zatížení hřídele 1 silami a momenty

Kde značí M_r krouticí moment od řemenu



Obr. 29 Zatížení hřídele 2 silami a momenty

Celková síla od bubnu působící na hřídel:

$$F_b = \frac{G_b}{2 \sin \alpha} = 124,6 \text{ N} \quad (30)$$

Síla od bubnu působící na hřídel ve směru x:

$$F_{bx} = F_b * \cos \alpha = 62,3 \text{ N} \quad (31)$$

Síla od bubnu působící na hřídel ve směru y:

$$F_{by} = F_b * \sin \alpha = 107,9 \text{ N} \quad (32)$$

Úhel natočení řemene od svislé polohy:

$$\alpha_r = 71,5^\circ$$

Síla od řemene působící na hřídel ve směru x:

$$F_{rx} = F_{vr} * \cos \alpha_r = 16,7 \text{ N} \quad (33)$$

Síla od řemene působící na hřídel ve směru y:

$$F_{ry} = F_{vr} * \sin \alpha_r = 50 \text{ N} \quad (34)$$

Zvolené rozměry:

Rozteč disků:

$$l_{rozt} = 80 \text{ mm}$$

Rozměry potřebné pro výpočet reakcí v ložiskách:

$$l_1 = 45 \text{ mm}$$

$$l_2 = 110 \text{ mm}$$

$$l_3 = l_2 + l_{rozt} = 190 \text{ mm} \quad (35)$$

$$l_4 = l_2 + 2 * l_{rozt} = 270 \text{ mm} \quad (36)$$

$$l_5 = 416 \text{ mm}$$

Rovnice rovnováhy:

$$R_{Bx} - F_{bx} + F_{rx} + R_{Ax} = 0 \quad (37)$$

$$R_{By} - F_{by} - F_{ry} + R_{Ay} = 0 \quad (38)$$

$$R_{Bz} + R_{Az} = 0 \quad (39)$$

$$F_{rx} * l_1 + \frac{1}{3} F_{bx} * l_2 + \frac{1}{3} F_{bx} * l_3 + \frac{1}{3} F_{bx} * l_4 - R_{Ax} * l_5 = 0 \quad (40)$$

$$-F_{ry} * l_1 + \frac{1}{3} F_{by} * l_2 + \frac{1}{3} F_{by} * l_3 + \frac{1}{3} F_{by} * l_4 - R_{Ay} * l_5 = 0 \quad (41)$$

Výpočet reakcí:

Reakce v ložisku A, směr x:

$$R_{Ax} = 30,3 \text{ N}$$

Reakce v ložisku A, směr y:

$$R_{Ay} = 43,9 \text{ N}$$

Reakce v ložisku A, směr z:

$$R_{Az} = 0 \text{ N}$$

Reakce v ložisku B, směr x:

$$R_{Bx} = 15,3 \text{ N}$$

Reakce v ložisku B, směr y:

$$R_{By} = 114 \text{ N}$$

Reakce v ložisku B, směr z:

$$R_{Bz} = 0 \text{ N}$$

Výsledná radiální síla působící na ložisko A:

$$R_A = \sqrt{R_{Ax}^2 + R_{Ay}^2} = 53,3 \text{ N} \quad (42)$$

Výsledná radiální síla působící na ložisko B:

$$R_B = \sqrt{R_{Bx}^2 + R_{By}^2} = 115,1 \text{ N} \quad (43)$$

Výsledná maximální radiální síla působící na ložiska:

$$R_{max} = R_B = 115,1 \text{ N} \quad (44)$$

Exponent rovnice trvanlivosti pro kuličková ložiska:

$$p = 3$$

Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska:

$$P_l = R_{max} = 115,1 \text{ kN} \quad (45)$$

Trvanlivost ložiska:

$$l_{h10} = \left(\frac{C_l}{P_l}\right)^p \frac{10^6}{60n_v} = 2,6 * 10^7 \text{ hod} \quad (46)$$

Při výpočtu životnosti ložisek byl zanedbán vliv přesunu hmoty v bubnu v průběhu mletí.

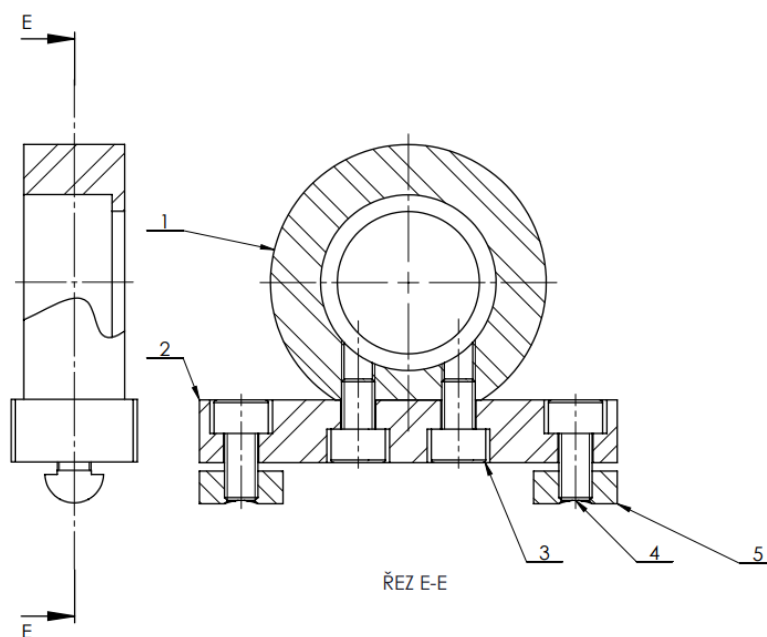
Hodnoty trvanlivosti ložisek jsou vysoké, jelikož síly zatěžující ložiska jsou malé a ložiska jsou navržena s ohledem na rozměry a až poté kontrolována na životnost.

Životnost ložisek byla též ověřena pomocí programu SKF SimPro Quick.

3.4.4. Ložiskové domky

Ložiskové domky jsou vyrobeny z hliníkové slitiny dle výkresové dokumentace (Obr. 30). Ložiskové domky slouží k uchycení ložisek na rám. Zároveň bude umožněn paralelní posuv válců vůči sobě. S ohledem na jednodušší výrobu a skladové zásoby polotovarů nebude ložiskový domek vyfrézovaný z jednoho kusu materiálu, ale bude zkompletován ze dvou dílů spojených šroubovými spoji.

Toto sestavení díky vůlím umožňuje kompenzaci případné nerovnoběžnosti jednotlivých profilů rámu. Při mírně kuželovitém tvaru mlecí nádoby je možnost pouzdro ložiska a desku pouzdra ložiska vůči sobě mírně natočit, což umožní vychýlení válců z rovnoběžné polohy a dosednutí nádoby na všechny segmenty bez křížení hřídelí v ložiskách.



Obr. 30 Schéma konstrukčního řešení ložiskového domku

1 – pouzdro ložiska, 2 – deska pouzdra ložiska, 3, 4 – šrouby, 5 – matice,

3.5. Zakrytování

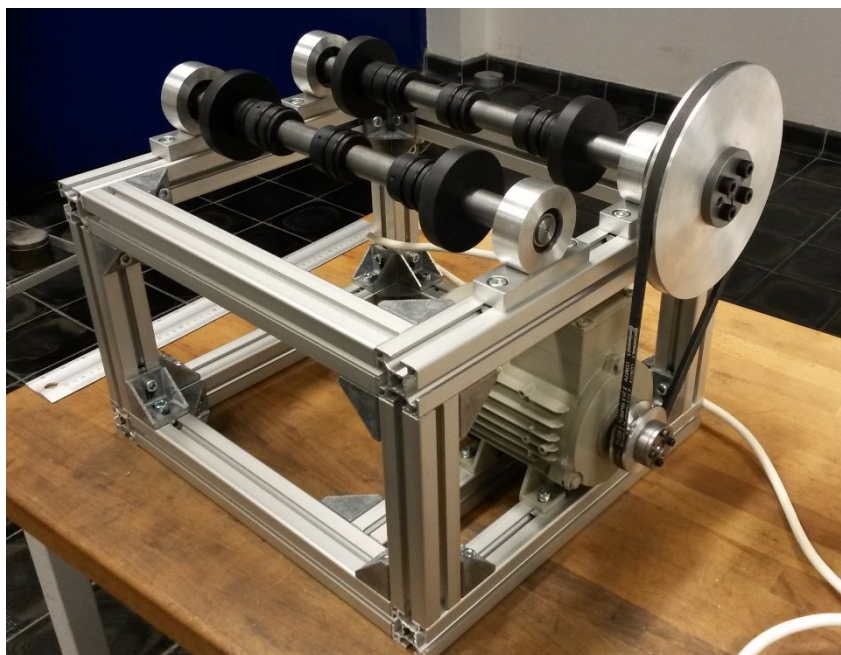
S ohledem na bezpečnost a vizuální stránku je vhodné zařízení zakrytovat. Zejména je nutné zamezení voleného přístupu k řemenu, pohybujícího se značnými obvodovými rychlostmi. Kryt lze zhotovit jako výpalek, který se naohýbá a svaří. Případně je v budoucnu vhodné zakrytovat spodní část zařízení, kde je motor, to zamezí případnému zanešení motoru prachem a zlepší vizuální stránku. Na kryt spodní části jsou voleny desky upevněné úhelníky na rám z extrudovaných profilů.

4. Technickoekonomické zhodnocení

4.1. Technické zhodnocení

Navržené, zkonstruované montované zařízení (Obr. 31) umožňuje využít recyklát, který je dále zpracováván 3D tiskem. Hlavní výhodou navrženého zařízení je možnost změny vybraných parametrů a snadná modulovatelnost.

Díky rámu z extrudovaných profilů, které mimo jiné umožňují uzpůsobení malé a velké mlecí nádobe, je možné rám snadno upravit dle požadavků a pomocí půlkruhových matic pro vložení do drážky s pružinou osadit dalším vybavením bez nutnosti vrtání a dalších větších úprav. Prodloužením 4 profilů v rámu a hřídelí lze provozovat více nádob najednou. Přidáním další hřídele by se počet nádob zdvojnásobil.



Obr. 31 Mlecí zařízení ve fázi montáže

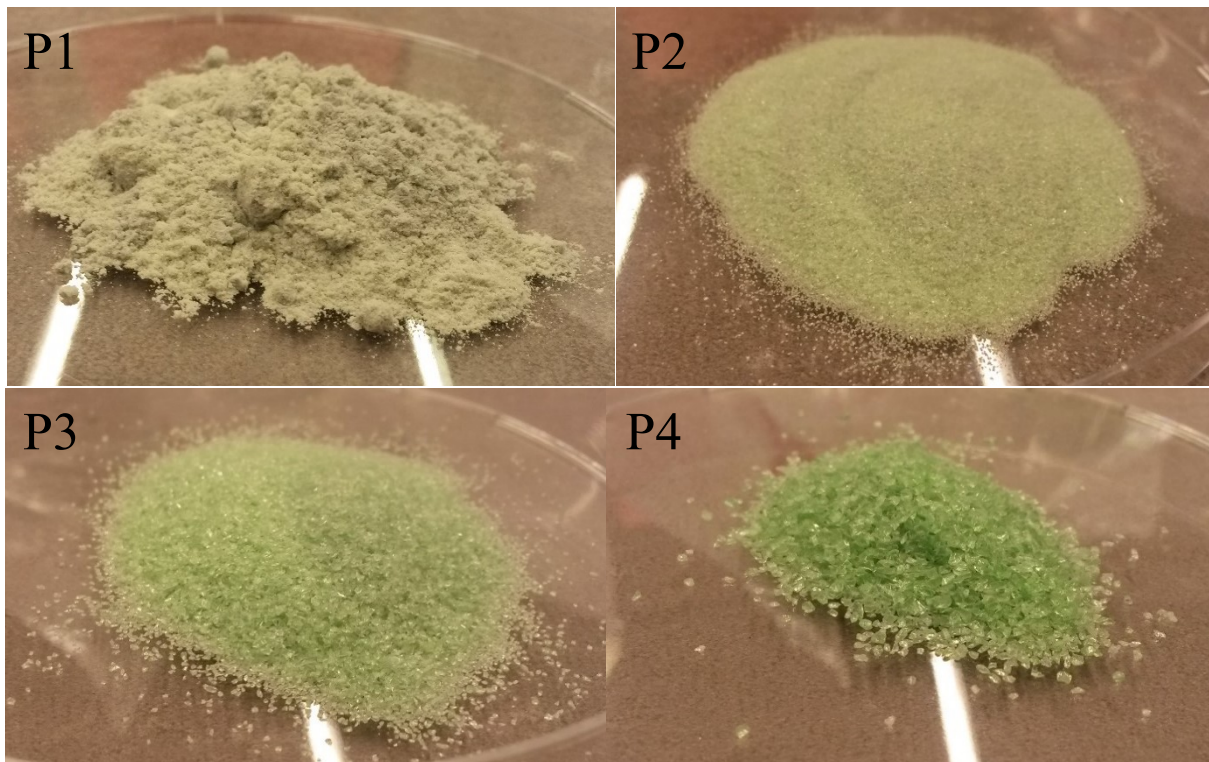
Jako válec se osvědčila varianta tvořená ocelovou tyčí a segmenty z PA66. Tímto řešením se docílilo úspory materiálu a snížení hmotnosti. Dále je možnost změny rozteče segmentů v závislosti na velikosti mlecí nádoby. Rozteč válců je snadno nastavitelná povolením 4 šroubů v ložiskových domcích, posuvem hřídele a opětovným dotažením šroubů pro zajištění polohy.

Ložiskový domek, zkompletován ze dvou dílů se šroubovými spoji, se pro experimentální zařízení ukázal jako vhodná varianta. Při výrobě více kusů by bylo vhodné zvážit použití vyfrézovaných domků z jednoho kusu materiálu, které by snížily čas montáže, hmotnost a zlepšily vizuální stránku.

S ohledem na výrobní možnosti dílny pracoviště KSR byla pro přenos krouticího momentu zvolena upínací pouzdra. Hlavní předností svěrného pouzdra je jednoduchost, jak na výrobu náboje s hřídelem, tak na montáž. Spojení perem by byla vhodná varianta při výrobě v dílně s náležitým vybavením.

Možnost nastavovat mlecí rychlost otáčení pomocí frekvenčního měniče nabízí zařízení porovnávání výsledků mletí při použití různých mlecích režimů. Energeticky i časově nejlepší výsledky se získají při optimální rychlosti otáčení, která odpovídá 1/2 až 2/3 kritické rychlosti otáčení, tedy kaskádovému (přejevovému) pohybu. Při použití mlecí nádoby velikosti 6 l se tato rychlost pohybuje kolem 48 otáček za minutu. Pro mlecí nádobu velikosti 1,3 l bude tato rychlost kolem 64 otáček za minutu.

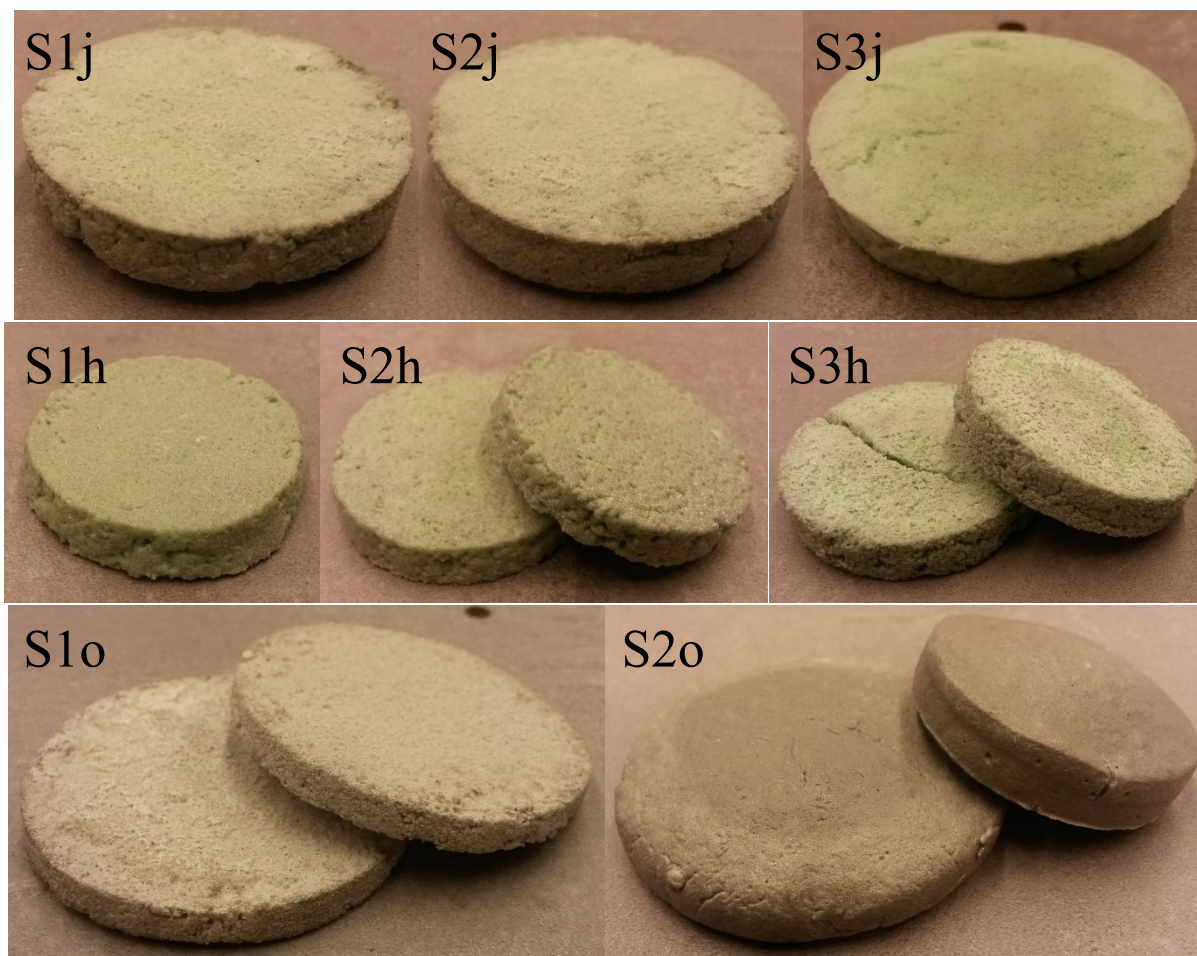
Po dokončení mlecího procesu má namletý materiál různé velikosti zrn (Obr. 32). Vzhledem k dalšímu zpracování je namletý materiál po fázi mletí přesíván na sítích pro získání několika frakcí různé granulometrie. Nejvíce je zastoupena nejjemnější frakce (Obr. 32P1).



Obr. 32 Namletý skelný recyklát (zelené obalové sklo) různé granulometrie:

P1 – velikost zrn do 125 μm , P2 – velikost zrn 125 μm až 250 μm , P3 – velikost zrn 250 μm až 500 μm , P4 – velikost zrn 500 μm až 1000 μm ,

Výzkum zaměřený na zpracování namletého materiálu technologií 3D tisku se mimo jiné zabývá vhodností použití jednotlivých frakcí a optimální teploty zpracování. Namletý a prosátý recyklát různé frakce byl sintrován při různých teplotách v rozmezí 550 °C až 800 °C (Obr. 33).



Obr. 33 Sintrované vzorky

S1j, S2j a S3j ze skelného recyklátu (zelené obalové sklo), jemnější frakce, spékané při různých teplotách v rozmezí 550 °C až 800 °C

S1h, S2h a S3h ze skelného recyklátu (zelené obalové sklo), hrubší frakce, spékané při různých teplotách v rozmezí 550 °C až 800 °C

S1o a S2o ze skelného recyklátu (čiré obalové sklo), jemnější frakce, spékané při různých teplotách v rozmezí 550 °C až 800 °C

4.2. Ekonomické zhodnocení

V průmyslové praxi se cena vyvinutého, prodávaného zařízení pohybuje až na pětinasobku výrobních nákladů, což odpovídá zkonstruovanému zařízení, které proti komerčně nabízeným je 3 až 5krát levnější. Ovšem oproti komerčně nabízeným zařízením v cenové relaci poskytuje značnou flexibilitu a snadnou změnu mlecích parametrů. Pro porovnání konkurenceschopnosti je nutné započítat práci dělníka, který by vyráběl díly a zařízení sestavoval, pokrýt náklady spojené s vývojem a marží. Po započtení těchto dalších nákladů je cena zařízení porovnatelná se zařízeními podobných parametrů nabízených na trhu. Při výrobě několika kusů zařízení se tyto náklady rozpočítají a cena za jedno zařízení začne klesat, zároveň při větším odběru materiálu a dílů je možné vyjednat lepší ceny u dodavatelů.

<u>Položka</u>	<u>Cena</u>
Mlecí nádoba	3 052 Kč
Koule 30 mm	152 Kč
Koule 40 mm	158 Kč
Koule 50 mm	190 Kč
<u>Celkem mlecí nádoba s koulemi</u>	<u>3 552 Kč</u>
Úhelníky	1 820 Kč
Matice	240 Kč
Šrouby	197 Kč
Extrudované profily.....	3 734 Kč
<u>Celkem extrudované profily + spojovací materiál</u>	<u>5 991 Kč</u>
Odpovídající motor	2 000 Kč
Odpovídající frekvenční měnič	5 000 Kč
Další elektro materiál	2 000 Kč
<u>Celkem elektro materiál</u>	<u>9 000 Kč</u>
Ložiska	380 Kč
Řemen.....	60 Kč
Upínací pouzdro KLBB	160 Kč
Upínací pouzdro KLCC	140 Kč
Polotovary Al + ocel.....	1 000 Kč
Polotovary PA.....	170 Kč
<u>Celkem ostatní nakupovaný materiál a díly</u>	<u>1 910 Kč</u>
<u>Cena celkem</u>	<u>20 453 Kč</u>

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a zkonstruovat zařízení flexibilních parametrů pro získání jemné drtě o žádané granulometrii pro následné technologické zpracování na experimentálním pracovišti 3D tisku. Jelikož se osvědčilo mletí v mlecí nádobě, návrh zařízení vyšel právě z konceptu použití vyměnitelné mlecí nádoby jako bubnu. Dále bylo třeba navrhnout převod. Na základě zevrubné rešerše se jako vhodná varianta ukázalo uspořádání převodu řemenem s uložením motoru pod bubnem, zajišťující úsporu místa.

Nejprve byly výstupy návrhu použity pro tvorbu skic a následnému modelování dílů. Prvotní konstrukce mlecího zařízení vycházela z velké části z koncepčního návrhu a cílila na nízkou hmotnost při zajištění pevnostních požadavků a životnosti jednotlivých komponent s dostatečnou bezpečností. Byl také proveden výpočet silových poměrů mezi válcem a bubnem s vypočtením maximální síly, kdy buben nebude vyhozen z válce. Následně bylo třeba postupně provádět konstrukční úpravy jednotlivých dílů i zařízení k zajištění značné parametrickosti, snadné výrobě a montáži jednotlivých komponent, úspoře materiálu a snížení ceny spojené jak s nákupem polotovarů a dílů, tak s výrobou. Celé zařízení bylo vyrobeno a sestaveno na základě přiložených výrobních výkresů (příloha 1).

Otázkou, která vyvstala při posuzování výsledků mletí, je dosažitelnost rovnoměrné velikosti namletého materiálu. Kvůli různé velikosti zrn je namletý materiál po fázi mletí přesíván na sítích pro získání několika frakcí různé granulometrie, přičemž nejvíce bylo nejjemnější frakce. Namletý a prosátý recyklát různé frakce byl sintrován při různých teplotách pro posouzení vhodnosti k dalšímu zpracování.

Během řešení dané problematiky bakalářské práce a po technickoekonomickém zhodnocení se ukázalo několik možností dalšího výzkumu a zefektivnění.

První možností zefektivnění procesu souvisí s výzkumem vlivu rychlosti otáčení a mlecího režimu na proces mletí. V současné době je mlecí rychlost volena na základě výpočtu optimální rychlosti otáčení. Zkonstruované zařízení umožňuje změnu rychlosti otáčení, nabízí se tedy další výzkum za účelem dosažení lepších výsledků mletí.

Na základě provedené zevrubné rešerše je dalším parametrem ovlivňujícím výsledky mletí teplota. Na trhu jsou zařízení umožňující tzv. kryomletí, kdy mletí probíhá při značně nižších teplotách, než je teplota okolí, omezujících tepelné ovlivnění mletého materiálu a tvorbu

mikroslitin. Zkonstruované zařízení není přímo uzpůsobeno pro experimenty s cíleným snížením teploty mletého materiálu.

V práci není věnována pozornost studiu dynamických účinků, přesahujících rozsah této práce. Dynamické účinky mají z velké části negativní vliv. Z hlediska konstrukce dynamické zatížení hřídelí a ložisek snižuje jejich životnost. Avšak dynamické účinky nemusí mít jen negativní vliv. Kromě samotného mletí by účinků způsobených převalováním koulí v bubnu šlo teoreticky využít při vhodném zachycení energie poskytované rázy a jejím následném využití, tedy rekuperaci, pro další rozmělnění materiálu nebo pohon jiného zařízení. Vliv rázů by šlo snížit, respektive tuto energii zrovnoměrnit, při použití více zařízení nebo bubnů rozložením fáze přepadávání koulí.

Seznam použité literatury

- [1] KELLER, Petr. *Aditivní technologie*. B.m.: TU v Liberci. 2022
- [2] *ISO/ASTM 52900:2015(en), Additive manufacturing — General principles — Terminology* [online]. [vid. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en:term:2.1.2>
- [3] *Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM) – Konstrukter.cz* [online]. 27. duben 2020 [vid. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [4] *The Mold Builder's Guide to Additive Manufacturing* [online]. 31. leden 2022 [vid. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/the-mold-builders-guide-to-additive-manufacturing>
- [5] Proces metody Laser Beam Melting na stroji s dvojitou dávkovací komorou. *ČVUT Fakulta strojní* [online]. [vid. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/dmls-3dtisk/>
- [6] *Is it possible to 3D Print with glass? | Solid Print3D* [online]. 2020 [vid. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.solidprint3d.co.uk/can-you-3d-print-with-glass/>
- [7] CAMARGO, I. L. de, C. A. FORTULAN a H. A. COLORADO. A review on the ceramic additive manufacturing technologies and availability of equipment and materials. *Cerâmica* [online]. 2022, **68**, 329–347. ISSN 0366-6913, 1678-4553. Dostupné z: [doi:10.1590/0366-69132022683873331](https://doi.org/10.1590/0366-69132022683873331)
- [8] KOCHÁNKOVÁ, Kateřina. *Recyklace*. Zlín, 2020. diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [9] RECYKLACE SKLA A JEJÍ VÝZNAM. *SPL Recycling* [online]. 2008 [vid. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.splrecycling.com/recyklace_skla_a_jeji_vyznam.html?PHPSESSID

- [10] VÁVROVÁ, Dana. *RECYKLACE SKLA*. Ostrava, 2011. bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [11] ŠŤASTNÁ, Jarmila a Mečislav KURAŠ. *Odpady, jejich využití a zneškodňování: jak správně třídit odpady a všechno, co s tím souvisí: s průvodkyní Martinou Vrbovou*. Praha: Český ekologický ústav, 1994. ISBN 80-85087-32-4.
- [12] ŠULCOVÁ, Karin. *Důsledky recyklace skla na těžbu sklářských písků a na změny krajiny* [online]. Ostrava, 2011 [vid. 2023-01-25]. diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/86241/SUL078_HGF_N2102_3904T005_2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [13] ŠŤASTNÁ, Jarmila. *Kam s nimi: jak správně třídit odpady a všechno, co s tím souvisí: s průvodkyní Martinou Vrbovou*. Praha: Česká televize, 2007. ISBN 80-85005-72-7.
- [14] ZEILER, Emil. *VÝROBA SKLA A RECYKLACE SKLENĚNÉHO ODPADU* [online]. Ostrava, 2011. bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/86855/ZEI012_HGF_B2102_2102R001_2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [15] STARÁ, Marie. 3D tisk skla [ústní sdělení]. Liberec. 2023
- [16] KORBAŘ, Tomáš a Antonín STRÁNSKÝ. *Technický slovník naučný: I. díl. A-F*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
- [17] BALÁŽ, Peter. *Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-74854-0.
- [18] PAVLÍK, Tomáš. *Vliv mletí na vlastnosti vápence*. Brno, 2018. bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [19] *hmz13_rv.pdf* [online]. [vid. 2022-12-06]. Dostupné z: http://users.fsid.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmz/hmz13_rv.pdf
- [20] NEIKOV, Oleg D., ed. *Handbook of non-ferrous metal powders: technologies and applications*. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2009. ISBN 978-1-85617-422-0.

- [21] EL-ESKANDARANY, M. Sherif. *Mechanical alloying: nanotechnology, materials science and powder metallurgy*. 2nd edition. Amsterdam Boston: William Andrew is an imprint of Elsevier, 2015. ISBN 978-1-4557-7752-5.
- [22] KORBAŘ, Tomáš a Antonín STRÁNSKÝ. *Technický slovník naučný: III. díl*. M-Po. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [23] MAŇAS, Miroslav, Michal STANĚK a David MAŇAS. *Výrobní stroje a zařízení. Stroje gumárenské a plastikářské I*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. ISBN 978-80-7318-596-1.
- [24] SVĚRÁK, Tomáš. *Dezintegrace, třídění a separace v procesech ultrajemného mletí = Disintegration, grain-sizing and separation in the ultrafine milling processes: teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru chemie, technologie a vlastnosti materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2018. ISBN 978-80-214-5673-0.
- [25] LEDVINKA, Jan. *Těžba, lomařství a úpravnictví*. Brno, 2005. studijní opory. Vysoké učení technické v Brně.
- [26] VIRÁGOVÁ, Tereza. *Sledování vlivu různých technologií mletí na vlastnosti portlandských cementů*. Brno, 2013. bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [27] KOCOUREK, Jiří. *Návrh konstrukce laboratorního kulového mlýnu, k mletí krystalických látek v prostředí suchém*. Brno, 2016. bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [28] Ball Milling | Material Milling, Jet Milling. *AVEKA* [online]. [vid. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.aveka.com/processing/ball-milling/>
- [29] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03302-3.
- [30] KŘIVÁNEK, Tomáš. *Kulové mlýny. ARTIK STUDIO s.r.o. - pece Nabertherm, kulové mlýny, keramické stroje, hrnčířské kruhy Nidec Shimpo* [online]. [vid. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.artikstudio.cz/kulove-mlyny/>

- [31] ČELADNÍK, Zdeněk. *Návrh čelní převodovky pohonu kulového mlýnu*. Ostrava, 2017. diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [32] KORBAŘ, Tomáš a Antonín STRÁNSKÝ. *Technický slovník naučný: II. díl. G-L*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
- [33] ŠVÉDA, Matěj. *Vliv různé technologie mletí na vlastnosti portlandského cementu*. Brno, 2017. diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [34] Mlýn kulový s víkem, uzávěr, těsnění. *JIPO* [online]. [vid. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.jipo-desna.cz/produkty/mlyn-kulovy-s-vikem>
- [35] *Mleci porcelánové koule* [online]. [vid. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.jipo-desna.cz/produkty/mleci-porcelanove-koule>
- [36] SURYANARAYANA, C. *Mechanical alloying and milling*. New York: Marcel Dekker, 2004. Materials engineering, 22. ISBN 978-0-8247-4103-7.
- [37] MOTOR TRIF 1500RPM 0.33HP 0.25KW C71 IP55 IMB3 400/460V 50/60HZ (EX 1LA7070-4AB10 - 100023022). *Ingeniería Boggio S.A.* [online]. [vid. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.ingenieriaboggio.com.ar/shop/product/100399548-motor-trif-1500rpm-0-33hp-0-25kw-c71-ip55-imb3-400-460v-50-60hz-ex-1la7070-4ab10-100023022-257849>
- [38] Frekvenční měniče – proč a jak | Elektromotory.cz. *K-drives* [online]. [vid. 2022-12-11]. Dostupné z: <http://www.elektromotory.cz/frekvencni-menice-proc-a-jak>
- [39] *Řemeny SKF pro přenos výkonu, PUB PT/P1 06875/I CS*. [online katalogový list]. B.m.: SKF Group, 2014.
- [40] ALESTRUNDA.CZ, wsb cz, Aleš Trunda. Dopravníkové válečky. *Screenservis* [online]. [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://screenservis.cz/products/dopravnikove-valecky-2/>

Seznam výkresové dokumentace a příloh

Příloha 1: Výkresová dokumentace:

- Výkres 2-BP S20000078-1-1 Podložka motoru
- Výkres 2-BP S20000078-3-2 Hnací řemenice
- Výkres 2-BP S20000078-4-2 Disk doraz
- Výkres 2-BP S20000078-4-3 Disk
- Výkres 3-BP S20000078-1-0 Mlecí zařízení
- Výkres 3-BP S20000078-2-0 Rám
- Výkres 3-BP S20000078-3-0 Převod řemenem
- Výkres 3-BP S20000078-3-1-1 Kryt řemene ohyb
- Výkres 3-BP S20000078-3-1-2 Kryt řemene
- Výkres 3-BP S20000078-3-3 Hnaná řemenice
- Výkres 3-BP S20000078-4-0 Hřídel s ložisky 1
- Výkres 3-BP S20000078-4-1 Ložiskový domek
- Výkres 3-BP S20000078-4-1-1 Pouzdro ložiska 1
- Výkres 3-BP S20000078-4-1-2 Pouzdro ložiska 2
- Výkres 3-BP S20000078-4-4 Hřídel 1
- Výkres 3-BP S20000078-5-0 Hřídel s ložisky 2
- Výkres 3-BP S20000078-5-4 Hřídel 2