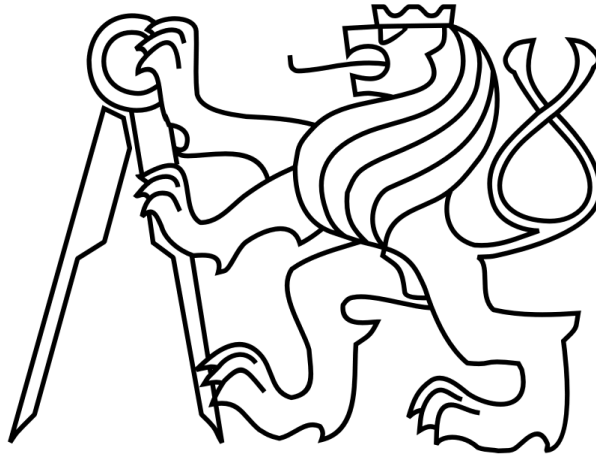


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

**Modifikace pásové pily pro odřezávání 3D tištěných dílců ze základových
desek po SLS**

2019

Adolf Valášek

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Valášek** Jméno: **Adolf** Osobní číslo: **465532**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Modifikace pásové pily pro odřezávání 3D tištěných dílců ze základových desek po SLS

Název bakalářské práce anglicky:

Modification of a specialized band saw for sawing metal 3D prints off of the base plate

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Konstrukční modifikace pásové pily firmy PILOUS-pásové pily, spol. s r.o. typ ARG 300 3D pro odřezávání 3D tištěných dílců ze základových desek; Osnova práce: Rešerše způsobu oddělování 3D tištěných dílců, rešerše strojů pro oddělování 3D tištěných dílců existujících na trhu. Návrh konstrukčních úprav pásové pily: Návrh doplňkové lineární osy pro polohování základové desky s 3D tištěnými dílci. Návrh sklápění desky do vodorovné polohy pro snadnější manipulaci se základovými deskami. Návrh odsávání prachových částic z místa řezu. Návrh automatizace procesu: Návrh nového způsobu upínání základových desek. Koncepční návrh automatizace s využitím robotu nebo manipulátoru manipulujícího se základovou deskou z 3D tiskárny; Rozsah grafické části: výkres sestavy upravené pily; výkres podsestavy lineární osy pro polohování; Rozsah textové části: 40-60 stran.

Seznam doporučené literatury:

HOUŠA, Jaromír a RUDOLF, Bedřich. Výrobní stroje. 3 přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00993-9; KOPECKÝ, Miloslav a HOUŠA, Jaromír. Základy stavby výrobních strojů. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1989. ISBN 80-01-00085-0; Firemní literatura a katalogy výrobců.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Miroslav Ondráček, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS


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


Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**


Ing. Miroslav Ondráček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

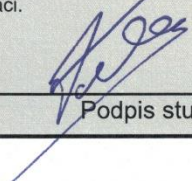

Ing. Matěj Sulítka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

29.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 20.5.2019

.....

podpis



Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Miroslavu Ondráčkovi, Ph.D. za plodné konzultace a užitečné rady. Dále můj dík patří Ing. Petrovi Zikmundovi, Ph.D. za poskytnutou možnost se věnovat tomuto tématu a za podporu během tvorby práce. Poděkování samozřejmě patří i mé rodině za podporu během studia a za technické rady mého otce.

Poděkovat bych chtěl i Jiřímu Károvi, který už bohužel není mezi námi. Jeho životní motta a výroky jsou velice inspirující.



Anotace

Autor:	Adolf Valášek
Název BP:	Modifikace pásové pily pro odřezávání 3D tištěných dílců ze základových desek po SLS
Rozsah práce:	59 stran, 38 obrázků, 4 tabulky
Akademický rok:	2018/2019
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí BP:	Ing. Miroslav Ondráček, Ph.D.
Zadavatel:	M E T A L 3D s.r.o.
Využití:	Koncepční návrh konstrukčních vylepšení vhodných pro finalizaci a použití na pile Pilous ARG 300 3D.
Klíčová slova:	3D tisk, SLS, pásová pila, konstrukční úpravy, automatizace, odsávání třísek, hydraulické upínání, upínací systémy, lineární osa
Anotace:	Tato práce se zabývá pásovou pilou specializovanou pro odřezání výtisků. Obsahuje porovnání dvou technologií pro tuto operaci (drátořez a pásová pila), řeší existujících strojů, návrh konstrukčních úprav a kontrolní výpočty.



Anotation

Author:	Adolf Valášek
Title of bachelor`s thesis:	Modification of a specialized band saw for sawing metal 3D prints off of the base plate
Extent:	59 pages, 38 pictures, 4 tables
Academic year:	2018/2019
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Miroslav Ondráček, Ph.D.
Submitter:	M E T A L 3D s.r.o.
Application:	Conceptual improvement design suitable for finalization and use on a Pilous ARG 300 3D bandsaw.
Key words:	3D printing, SLS, bandsaw, conceptual design, automatization, chip suction, hydraulic clamping, clamping systems, linear axis
Annotation:	This thesis deals with a specialized bandsaw for DMLS 3D printing. It contains a comparison of two applicable technologies (wire EDM and bandsawing), research of existing machines, improvement design and control calculations.



Seznam použitých zkratk

SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
PVD	Physical Vapour Deposition
CVD	Chemical Vapour Deposition
PLC	Programmable Logic Controller

Seznam použitých veličin

a	[m/s ²]	Zrychlení
C	[kN]	Základní dynamické zatížení
C_0	[kN]	Základní statické zatížení
d	[mm]	Velký průměr šroubu
d_2	[mm]	Střední průměr šroubu
d_3	[mm]	Malý průměr šroubu
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
f	[N]	Třecí síla jednoho vozíku
F_b	[N]	Síla boční
F_{bmax}	[N]	Maximální přípustná síla boční
F_e	[N]	Ekvivalentní dynamická zátěž
F_h	[N]	Upínací síla horizontální
F_j	[N]	Jmenovitá síla hydraulických válců při 100 bar
F_{krit}	[N]	Kritická síla vzpěru
F_n	[N]	Upínací síla normálová
F_o	[N]	Osová síla šroubu
F_p	[N]	Posuvová síla
F_{pmax}	[N]	Maximální přípustná posuvová síla
F_s	[N/cm ²]	Jmenovitá upínací síla magnetu
F_t	[N]	Tečná síla
F_{tmax}	[N]	Maximální přípustná tečná síla
F_v	[N]	Síla vzpěry
g	[m/s ²]	Gravitační zrychlení
h	[mm]	Výška magnetu
h_m	[mm]	Výška matice
h_{max}	[mm]	Maximální řezná výška
H_1	[mm]	Nosná výška závitů
i	[-]	Počet chodů závitů
J	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu
k	[-]	Statická bezpečnost
k_v	[-]	Bezpečnost na vzpěr
l	[mm]	Délka nosníku



l_0	[mm]	Rozteč vozíků v ose pohybu
l_1	[mm]	Rozteč vozíků kolmo na osu pohybu
l_2	[mm]	Vzdálenost těžiště obrobku od středu pojezdu
l_3	[mm]	Vzdálenost těžiště obrobku od středu pojezdu
l_4	[mm]	Vzdálenost těžiště pojezdu od pohybového šroubu
l_5	[mm]	Vzdálenost těžiště obrobku od pohybového šroubu
l_d	[mm]	Délka základní desky
l_s	[mm]	Délka zdvihu
l_{ξ}	[mm]	Délka pohybového šroubu
L	[km]	Životnost lineárního vedení
m	[kg]	Hmotnost celé sestavy
m_1	[kg]	Hmotnost obrobku
m_2	[kg]	Hmotnost pojezdu
$m(x)$	[Nmm]	Jednotkový ohybový moment na souřadnici x
$M_{k\xi}$	[Nmm]	Kroutící moment šroubu
$M(x)$	[Nmm]	Ohybový moment na souřadnici x
n	[-]	Počet desek týdně
N_k	[Kč]	Náklady na odříznutí v kooperaci
N_p	[Kč]	Náklady na pořízení pily
N_v	[Kč]	Náklady na odříznutí ve firmě
p	[bar]	Tlak
p_k	[MPa]	Kontaktní tlak
P	[mm]	Rozteč závitu
P_c	[W]	Příkon motoru
q	[N/mm]	Spojité zatížení nosníku
s_1	[mm]	Dráha rozběhu
s_2	[mm]	Dráha běhu
s_3	[mm]	Dráha doběhu
t_1	[s]	Čas rozběhu
t_2	[s]	Čas běhu
t_3	[s]	Čas doběhu
t_n	[týden]	Doba návratnosti investice
$u_{1,2}$	[mm]	Vzdálenost upínky od osy rovnováhy
v	[mm]	Deformace
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
w	[mm]	Šířka magnetu
Δx	[mm]	Délka vzpěry promítnutá do horizontální roviny
Δy	[mm]	Délka vzpěry promítnutá do vertikální roviny
Δy_2	[mm]	Vzdálenost horní hrany sestavy od osy sklápění
z	[-]	Počet závitů v matici
z_{ξ}	[-]	Počet činných závitů v matici



α	[°]	Úhel mezi vzpěrou a horizontální rovinou
β_n	[°]	Úhel boku
γ	[°]	Stoupací úhel
η	[-]	Účinnost
μ	[-]	Koeficient kinematického tření
μ_0	[-]	Koeficient statického tření
σ_d	[MPa]	Napětí v tlaku
σ_k	[MPa]	Mez napětí v kluzu
σ_{red}	[MPa]	Redukované napětí
τ_k	[MPa]	Smykové napětí v krutu
φ'	[°]	Třecí úhel



Obsah

1 Úvod	12
2 Rešerše	13
2.1 Přehled technologií	13
2.1.1 Pásová pila.....	14
2.1.2 Elektroerozivní drátování.....	17
2.2 Technologické srovnání drátořezu a pásové pily	20
2.2.1 Z hlediska přesnosti.....	20
2.2.2 Z hlediska ovlivnění výtisku.....	22
2.2.3 Z hlediska technologičnosti.....	23
2.3 Ekonomické srovnání drátořezu a pásové pily	25
2.3.1 Z hlediska ceny oddělení.....	25
2.3.2 Z hlediska času oddělení	26
2.4 Přehled výrobců a konkrétních strojů pro odřezávání výtisků	27
2.4.1 SODICK VL400Q.....	28
2.4.2 FANUC ROBOCUT α -C600iA	29
2.4.3 KLAEGER bitron300 3D.....	30
2.4.4 KASTO KASTOwin amc.....	31
2.4.5 Pilous ARG 300 3D.....	32
2.5 Zhodnocení.....	33
3 Vlastní řešení.....	34
3.1 Návrh systému upínání	34
3.1.1 Magnetické upínání v kombinaci s původním řešením	34
3.1.2 Hydraulické upínání	35
3.1.3 Excentrické upínací šrouby	36
3.2 Návrh sklápění desky do horizontální polohy pro snadnější manipulaci.....	38
3.3 Návrh nastavení výšky řezu (lineární osa).....	40
3.4 Návrh odsávání zbytkového prášku a třísek z místa řezu	43
3.5 Koncepční návrh automatizace procesu se začleněním robotického podavače a další kroky pro zvýšení funkčnosti a stupně automatizace pily.....	45
4 Výpočtová část	47
4.1 Stanovení řezných sil.....	47
4.2 Kontrola upínacích systémů.....	47



4.2.1 Magnetické upínání.....	47
4.2.2 Hydraulické upínání	49
4.2.3 Upínání excentrickými šrouby.....	50
4.3 Kontrola sklápěcího mechanismu, lineárního vedení a pohybového šroubu..	50
4.3.1 Kontrola sklápěcího mechanismu	50
4.3.2 Kontrola lineárního vedení.....	51
4.3.3 Kontrola pohybového šroubu	52
5 Závěr.....	54
Použitá literatura a zdroje.....	56
Seznam obrázků	58
Seznam tabulek	59
Seznam příloh.....	59
Výkresová dokumentace.....	59
Elektronické přílohy	59



1 Úvod

Cílem této bakalářské práce jsou konstrukční úpravy pásové pily pro odřezávání výtisků ze základní desky DMLS 3D tiskárny. Jedná se o velmi specifickou operaci a specializovaných komerčních řešení je pouze hrstka. Konkrétní pila, která je předmětem zájmu, byla vyvinuta ve spolupráci firem Pilous s.r.o. a Metal 3D s.r.o. a jedná se o komerčně prodávané řešení tohoto problému.

Protože se ale jedná o první verzi, je na pile prostor pro řadu inovací, které vyplývají ze zpětné vazby koncových uživatelů. Konkrétní problémy, které se budou řešit a na které vznikne návrh konstrukčního řešení je způsob upnutí základních desek na pilu, sklápění základní desky do vodorovné polohy, odsávání prachových částic a třísek z místa řezu a nastavení výšky řezu nad základní deskou.

Upnutí desek je momentálně řešeno pomocí čtyř šroubů, cílem je náhrada za jiný typ upínání s výpočtem upínacích sil.

Sklápění základní desky bude přínosné pro obsluhu stroje. Těžké desky s výtisky nebude nutnost ustavovat ve vertikální poloze, bude stačit pouze desku usadit v horizontální poloze a sklopit do pracovní roviny.

Odsávání zbytkového prachu a třísek je důležité, protože jemný kovový prášek je náchylný na vznícení. Pokud je řez veden skrz kapsu obsahující přebytečný prášek uzavřený v tomto prostoru při tisku, vzniká potenciální nebezpečí. Proto je třeba prášek odsát.

Nastavení výšky řezu je pak důležité z hlediska přesnosti řezu. Pokud je odříznutí finální operace výrobu, může existovat požadavek na přesný rozměr odříznutí. Momentálně je na pile ruční klička s pohybovým šroubem zajišťující nastavení výšky řezu bez odčítání. Cílem je přidat lineární pohybovou osu se zpětnou vazbou.

Dále bude provedena studie pro možnou vyšší automatizaci procesu. Na základě vytížení v provozu budou navrženy kroky a možná řešení pro zvýšení automatizace a produktivity.

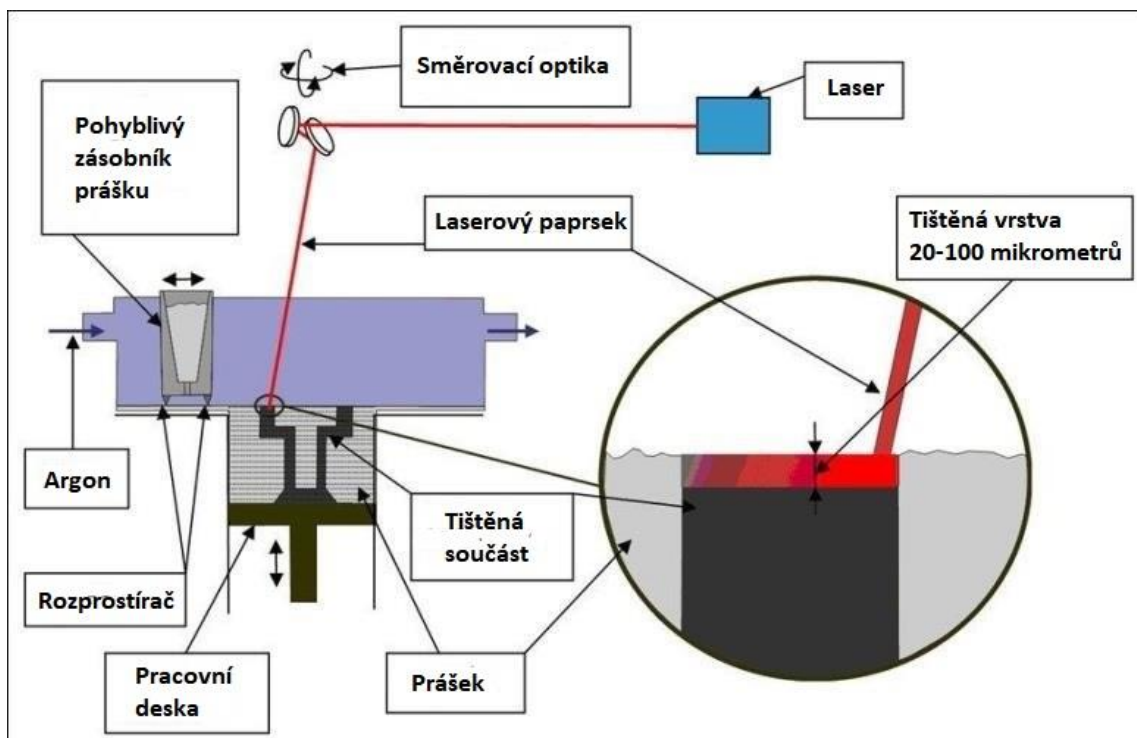
U všech konstrukčních řešení budou provedeny nezbytné kontrolní výpočty.

Výstupem bude 3D model všech řešení a příslušné výkresy sestav.

2 Rešerše

2.1 Přehled technologií

3D tisk pomocí technologie SLS (Selective Laser Sintering), nebo v tomto případě konkrétněji DMLS (Direct Metal Laser Sintering) je v dnešní době nejpoužívanější způsob tisku kovu. Umožňuje tisk z poměrně velkého spektra materiálů, od nerezové oceli přes titan až po zlato. Díky těmto materiálům a možnostem technologičnosti konstrukce se začíná masově nasazovat i do sériové výroby, kde nahrazuje komplexní sestavy jednodušším tištěným dílem, či čistě jako náhrada složité výroby dílce jedinou operací.



Obr. 1: Schéma procesu DMLS tisku. [přeloženo][4]

Princip technologie DMLS je jednoduše popsitelný, avšak složitě proveditelný. Vše se točí okolo jemného kovového prášku. Každou vrstvu se vysype dávka prášku do tiskového prostoru a rozprostře se v tloušťce určené vrstvy. Tloušťka vrstev se pohybuje od 20 do 100 μm . Po nanesení této nové vrstvy se vrhne do práce výkonný laser, který pomocí soustavy čoček vypálí a speče s předchozí vrstvou přesně danou geometrii vycházející z 3D modelu. Schéma celého procesu je na obrázku 1. Výkony těchto laserů jsou v řádu stovek wattů, větší tiskárny mohou mít dokonce i dva či čtyři lasery. Toto spékání je však proces, který musí probíhat v inertní atmosféře podobně jako svařování. V případě absence inertní atmosféry hrozí vznícení kovového prášku. Například u hliníku, jehož prášková forma se hojně používá v pyrotechnice díky své vysoké hořlavosti, je toto riziko obzvláště vysoké. Po spečení vrstvy se celý proces opakuje, čímž po určité době vznikne hotový výtisk obklopený masou prášku. Nevyužitý prášek se odstraní z tiskového prostoru a recykluje se pro další použití. Zbyte pak jen základní deska s výtiskem, který je potřeba následně oddělit. Jak lze poznat z předchozích řádků, 3D tisk kovů přináší mnoho úskalí a mimo samotnou tiskárnu se neobejde bez různých

podpůrných strojů, které z tisku dělají komplexní průmyslový proces. Proto jsou kovové 3D tiskárny tak ojedinělé, komplikované a hlavně drahé. Určitě se nejedná o stroje, které by měl běžný smrtelník doma.

A právě na tu část kdy je potřeba oddělit výtisk ze základní desky je zaměřena tato práce. Oddělování výtisků ze základní desky DMLS 3D tiskárny je část procesu při výrobě součástí pomocí této technologie. Výtisky jsou k základní desce přivařené (obrázek 2), tudíž se nejedná o žádnou lehkou operaci.



Obr. 2: Výtisky přivařené k základní desce [1]

Oddělování výtisků je hodně specifická operace, na kterou lze uplatnit pouze dvě automatizovatelné technologie: odříznutí pomocí pásové pily a oddělení na drátovce, která využívá elektroerozivní obrábění. Lze se vydat i cestou dláta, kladiva a štípacích kleští, ale při tomto postupu hrozí poničení vytištěných dílů a navíc je to velice zdouhavá a krkolomná práce. Další technologie nepřipadají v úvahu, hlavně kvůli tomu, že je třeba obsáhnout celou plochu základní desky, která může mít rozměry od 100x100 mm do 500x500 mm a v případě těch největších tiskáren i více. Pásové pily jsou schopné toto kritérium splnit, ale běžné dílenské pily nejsou příliš vhodné pro upínání těchto základních desek. Dalším úskalím této operace je rozmanitost materiálů. Je třeba zajistit, aby vybraná technologie byla vhodná pro všechny tištěné materiály. Elektroerozivní obrábění na drátovce tato kritéria též splňuje, proto je alternativou k pásovým pilám.

Další důležité kritérium pro výběr technologie je vliv na základní desku. Obecně se je snaha jí co nejméně poškodit, aby byla vhodná k recyklaci přebroušením a dalšímu použití v tiskárně. To eliminuje ostatní, spíše destruktivní technologie.

2.1.1 Pásová pila

2.1.1.1 Princip

Nejjednodušší způsob, jak dostat výtisky z desky, je pomocí pásové pily. Její princip je velice jednoduchý. Základem je pilový pás, který obíhá stále dokola na několika kotoučích, z nichž jeden je hnaný a jeden či více jsou vodící. Pro zajištění směru řezu je pás také veden různými kladkami. Pásové pily se používají hlavně pro dělení materiálu nebo právě odřezávání. Přesnost pásové pily je přibližně 0,051 mm na 1 palec (25,4 mm) řezu. [2]

2.1.1.2 Dělení pásových pil

- 1) Ruční/gravitační
- 2) S hydraulickým válcem
- 3) Dvousloupové s hydraulickým válcem
- 4) Dvousloupové CNC



Obr. 3: Běžná dílenská pila s hydraulickým válcem Bomar STG 220

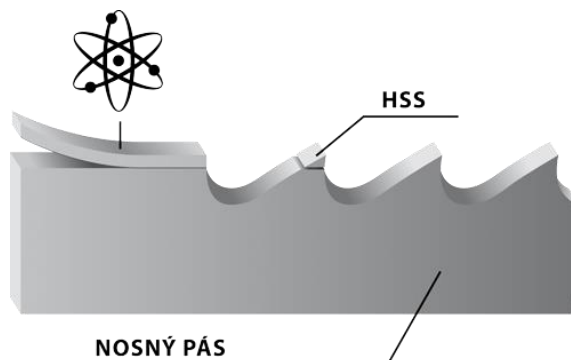
Posuv při řezání může být realizován několika způsoby. Nejjednodušší je gravitační posuv, kdy je pila vedena řezem svou vlastní tíhou, se silovou asistencí vinuté pružiny nebo operátora pily. Toto řešení se objevuje zejména u menších pil pro domácí použití nebo nízkoobjemovou výrobu. Pro vyšší sériovost se dá ovládat rychlost posuvu hydraulickým válcem s nastavitelným tlumením. Tohoto řešení využívá pila na obrázku 3. Při tomto řešení probíhá proces tak, že operátor zdvihne pilu do počáteční polohy, připraví řezaný kus k řezu na příslušný rozměr a po upnutí a zapnutí motoru nastaví rychlost sestupu na hydraulickém válci. Po dokončení řezu rameno pily automaticky vypne elektromotor pomocí koncového spínače. U těchto pil může být instalován hydraulický agregát, který pilu do počáteční polohy vysune sám, bez pomoci operátora. Nejpokročilejší pásové pily pro velkoobjemovou výrobu jsou ovládány CNC systémem, který si může pomocí PLC počítače hlídat všechny vstupní a výstupní snímače pro upnutí obrobku, cirkulaci chladicí kapaliny, chod motoru, polohu ramene a další. CNC řízení pásové pily také umožňuje naprosto přesnou kontrolu nad řeznými podmínkami, ať už se jedná o řeznou rychlost pilového pásu nebo hodnotu posuvu. Mimo klasické ramenové pily existují dvousloupové konstrukce, kde místo otočného pohybu ramena je pás veden lineárně po vedení na podpůrných sloupech.

2.1.1.3 Pilové pásy

Pro nenáročnou výrobu jsou používány pásy z uhlíkové oceli díky své nízké ceně. I když se opotřebují rychleji než bimetalové pásy, běžně jsou nasazovány na řezání nízkouhlíkové oceli a jiných měkkých kovů, například hliníku, mědi a bronzu. Tyto pásy jsou také dostupné s tvrzeným tělem, či nikoli. Tvrzené tělo nabízí větší podporu, což má za následek přesnější, rychlejší řez podobných kovů. Pokud pás nemá tvrzené tělo, je ideální k řezání materiálů jako je hliník, které jsou vhodné pro řezání za vyšších rychlostí, protože pás není tolik namáhán únavou při rychlém ohýbání okolo kladek pily. Díky vynechání nákladů na tvrzení jsou „ohebné“ pásy preferovanou ekonomičtější volbou.

Doporučené předpětí takových pilových pásů se pohybuje okolo 140 MPa a v řezu by mělo být v jednu chvíli 6-18 zubů. [2]

Bimetalové pásy mají navařené zuby z rychlořezné oceli na tělo z pružinové oceli (obrázek 4). Takové pásy se používají pro řezání většiny ocelí, nerezových ocelí, některých nástrojové ocelí, hliníku, monelu a inconelu. Řez bimetalových pásů je přesnější díky vyššímu předpětí a mají vyšší životnost při řezání většiny materiálů v porovnání s pásy z uhlíkové oceli, což znamená i nižší cenu řezu navzdory vyšší pořizovací ceně. Při použití bimetalových pásů by v jednom okamžiku měly být v záběru minimálně 3 zuby s tím, že 6-12 jsou optimální. Předpětí je pak okolo 220 MPa. [2]



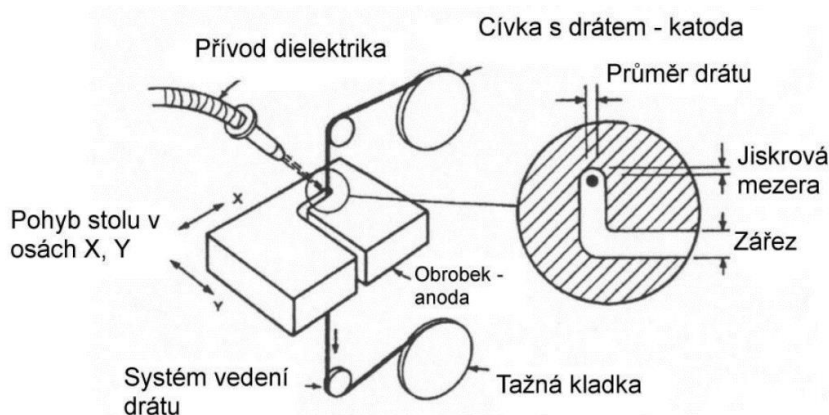
Obr. 4: Konstrukce bimetalového pásu [3]

Po bimetalových pásech už jsou jen karbidové pásy, kdy je opět tělo z pružinové oceli a špičky zubů jsou ze slinutých karbidů. Stejně jako u ostatních nástrojů ze slinutých karbidů, i zde je možnost povlakování. Pomocí CVD (chemical vapour deposition) či PVD (physical vapour deposition) povlakování je tak možné zvýšit životnost a otěruvzdornost karbidového pilového pásu. Karbidové pásy se používají hlavně pro řezání těžkoobrobitelných materiálů a superslitin, protože vydrží více než pásy bimetalové. Mimo to je lze samozřejmě použít i pro řezání hliníku pro dosažení takřka nekonečné životnosti.

Pro oddělení výtisků však nelze použít běžnou pásovou pilu na kov, a to zejména kvůli způsobu upínání obrobku. U dílenských pásových pil se využívá svěrák, který by v případě upnutí základní desky držel jen dvě malé obdélníkové boční plochy desky. U tohoto upnutí hrozí vychýlení desky a klesá přesnost řezání. Je tedy zřejmá nutnost speciální pily pro odřezávání výtisků. V ojedinělých případech ovšem samozřejmě lze využít běžnou pilu.

2.1.2 Elektroerozivní drátování

Druhou variantou je oddělení výtisků na elektroerozivní drátovačce. Elektroerozivní obrábění může být také použito pro hloubení, leštění, mikroděrování a elektrokontaktní obrábění. Jedná se o nekonvenční metodu obrábění elektrotepelného druhu. Pro lepší představu je na obrázku 5 vyobrazeno schéma celého procesu.



Obr. 5: Schéma elektroerozivního drátování [7]

2.1.2.1 Princip [5]

Elektroerozivní obrábění využívá opakovaných elektrických výbojů, ke kterým dochází mezi nástrojem a obrobkem v dielektriku. Na proces mají vliv následující faktory:

- Způsob dodání energie – polarita zapojení, druh obvodu, elektrické charakteristiky výbojů a jejich doba trvání + frekvence
- Pracovní prostředí a jeho vlastnosti (dielektrikum)
- Materiál nástrojové elektrody vzhledem k obráběnému materiálu

Časový průběh energie do místa výboje dále dělí elektroerozivní obrábění na:

- Elektrojiskrový způsob
- Elektroimpulsní způsob

Elektrojiskrový způsob má spíše kratší dobu výboje ($10^{-4} - 10^{-7}$ s) a poměrně vysokou frekvenci (0,1 – 200 kHz). Tepelný účinek dopadu záporných elektronů vyvolává vysokou koncentraci energie ($10^5 - 10^7$ W/mm²) a teplota dosahuje až 10 000 °C. Kvůli krátké době trvání jednoho výboje mají tyto malou energii ($10^{-5} - 10^{-1}$ J) a odpovídající úběr materiálu jedním výbojem je také menší. Díky tomu vznikají na obrobku menší krátery a je dosahováno lepší drsnosti povrchu Ra 0,2 – 0,8. Jako zdroj těchto impulsů slouží jednoduchý závislý relaxační generátor (RC, RLC). Používáno je napětí 80 – 300 V, výkon 0,5 – 20 kW a úběr u oceli dosahuje 1000 mm³/min. [5]

Elektroimpulsní způsob funguje na bázi krátkodobých obloukových výbojů (impulsů). Oproti elektrojiskrovému způsobu je delší trvání jednoho výboje ($10^{-3} - 10^{-1}$ s) a také větší energie jednoho impulsu až 100 J. Převažuje iontová vodivost a vznikají menší teploty (3500 °C) díky nižšímu napětí (20 – 100 V) a průchodu proudem vysoké intenzity (1000 A/mm²). Oproti elektrojiskrovému způsobu je větší úběr materiálu na nástrojové elektrodě, ale větší úběr materiálu celkově (10 000 mm³/min).



2.1.2.2 Dielektrikum [5]

Je pracovní prostředí tohoto procesu. Jeho druh má zásadní vliv na průběh a výslednou kvalitu elektroeroze.

Funkce dielektrika:

- Odvod částic vzniklý elektroerozí
- Ochlazování elektrod
- Izolace elektrod pro umožnění vzniku výboje

Vlastnosti dielektrika:

- Ekologie a hygiena – nesmí být zdraví a přírodě škodlivé
- Viskozita – pro správnou funkci
- Chemie – neutrální pro zamezení koroze obrobku
- Tepelné vlastnosti – pro odvod tepla a proti vzplanutí
- Ekonomie – cena a dostupnost

Kvůli požadovaným vlastnostem pro správnou funkci dielektrika jsou při výběru omezené možnosti. V současné době se používají tyto kapaliny:

- Lehký strojní olej
- Petrolej
- Transformátorový olej
- Deionizovaná voda (tzv. demi voda)
- Speciální dielektrika výrobců strojů

Pro účely elektroerozivního drátování se dává přednost deionizované vodě. Deionizovaná (nebo také demineralizovaná voda) je zbavená většiny iontově rozpustných látek. Díky tomu má sníženou vodivost a je vhodnější pro použití jako dielektrikum. Může se vyrábět destilací, nanofiltrací, elektrodialýzou nebo ultrafiltrací.

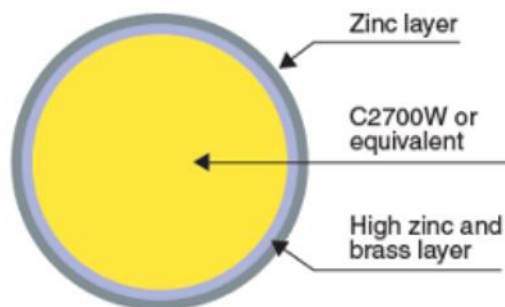
2.1.2.3 Nástrojová elektroda

Při drátování musí nástrojový drát splňovat určité požadavky pro optimální výsledky. Musí mít:

- Vysokou elektrickou vodivost
- Dostatečnou mechanickou pevnost
- Vysokou přesnost průměru a kruhovitosti
- Rozumnou cenu

Elektrická vodivost je nutná, protože je elektrodou do místa řezu přiváděn elektrický proud značné velikosti a elektrodu významně zatěžuje. Mechanická pevnost je důležitá pro přesnost řezu, protože kvůli nízkému předpětí by mohlo dojít k vychýlení drátu a vzniku nepřesnosti v podobě zhoršeného povrchu a špatných rozměrů. Geometrická přesnost odvíjeného drátu je už pak jen třešničkou na dortu přesnosti této metody.

Používané materiály pro oběžný drát jsou měď, mosaz, molybden a wolfram. Měď se používá pro dráty středního průřezu (0,15 – 0,25 mm). Dráty většího průřezu se z pravidla vyrábějí z mosazi, zatím co pro velmi jemný řez se používají dráty z molybdenu a wolframu. Jejich průměry se pohybují v řádech setin milimetrů, od 0,03 mm do 0,07 mm. Trendem v oblasti elektroerozivního drátování je jako v ostatních oblastech použití povlakovaných nástrojů. Povlakované dráty umožňují vyšší rychlost řezání, vyšší vodivost či snížení tření v místě řezu. Povlakuje se pak zinkem, mědí a wolframem s příslušným účinkem. Průřez drátu s bronzovým jádrem a zinkovým povlakem je na obrázku 6. [5]



Obr. 6: Průřez povlakovaného řezacího drátu [6]

2.2 Technologické srovnání drátořezu a pásové pily

Protože se jedná o dvě rozdílné technologie, budou uvedeny jejich technologické možnosti v případě oddělování výtisků z desky. Technologické srovnání bude zaměřené na přesnost a na ovlivnění výtisku.

2.2.1 Z hlediska přesnosti

Co se přesnosti těchto dvou technologií týče, je nejdůležitější rozměrová přesnost a kvalita povrchu. Oba tyto parametry lze u obou technologií ovlivnit různými parametry. Obecně lze spolehlivě říci, že přesnost a kvalita povrchu nebude u pásové pily nikdy větší, než u drátořezu. Pro věcné srovnání jsou ale důležitá čísla a kvantifikace rozdílů.

2.2.1.1 Pásová pila

Dosahuje spíše horších přesností a povrchů. Jak jsem zmínil v kapitole 2.2.1., přesnost pásové pily je 0,051 mm na 25,4 mm řezu. U desky o velikosti 250x250 mm je pak tedy výsledná přesnost 0,502 mm. Toto číslo je bráno jako výchozí, po úpravě parametrů lze dosáhnout i lepších hodnot. Při špatném předpětí pásu anebo nevhodném upnutí obrobku může ale přesnost padnout až na 3 mm.

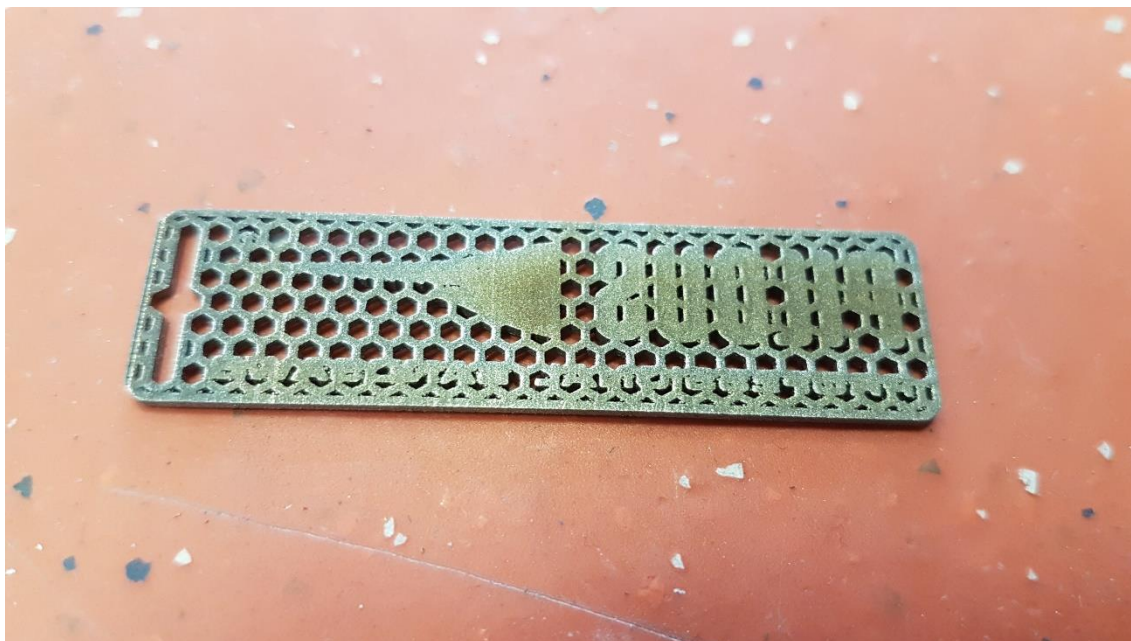


Obr. 7: Povrch po odříznutí výtisku na pile

Co se kvality povrchu týče, tam je to také spíše mrzuté. Po odřezání jsou na povrchu velice viditelné směrové známky po obrábění, viz. obrázek 7. Střední hodnota profilu Ra je v nejlepším případě 12,5, ale v praxi jsou o mnoho běžnější hodnoty Ra 25 nebo při špatných podmínkách až Ra 50. Pokud má být povrch po odřezání výtisku finální a funkční, je vhodné přistoupit k další úpravě, například zabroušení na pásové brusce.

2.2.1.2 Drátořez

Je na tom poněkud lépe, co se týče přesnosti a kvality povrchu. Díky malému průměru řezacího drátu a vysoké kontrole nad řezným procesem se dosahuje přesnosti až na 0,001 mm. Taková přesnost samozřejmě platí ale pro superdokončovací operace drátování. Při běžném drátování načisto je výsledná přesnost okolo 0,005 mm a při drátování nahrubo klesá až na 0,025 mm, což je ale pořád skvělá hodnota, pokud je řeč o oddělování výtisků. Vysoká kontrola nad řezným procesem navíc zajišťuje výbornou předvídatelnost a v podstatě se dá říci, že parametry jednoznačně určují výsledek obrábění. Toto si netroufám tvrdit o ostatních obráběcích technologiích.



Obr. 8: Povrch po oddělení na drátovačce

Kvalita povrchu je na drátovačce také o mnoho lepší než pásová pila. Příklad povrchu po odříznutí na drátovačce je vidět na obrázku 8. Po prvním hrubovacím řezu je drsnost povrchu Ra pod hodnotou 3,2. Pro potřeby oddělování výtisků opět skvělá a dostačující hodnota, ale tato technologie má větší potenciál. Po třech dokončovacích řezích klesne drsnost pod Ra 0,4. Při dalším dokončovacím drátování se lze dostat až na Ra 0,1 u materiálů s vyšší hustotou. Takto nízké hodnoty mohou ušetřit prostředky díky vynechání broušení povrchu. Navíc je díky náhodnému charakteru výbojů profil povrchu směrově náhodný, což může být užitečné pro jiné aplikace. [8]

Tabulka 1: Srovnání přesnosti drátořezu a pásové pily

	Přesnost [mm]		Povrch [Ra]	
	Min	Max	Min	Max
Pásová pila	0,502	3	12,5	50
Drátovačka	0,001	0,03	0,1	3,2

2.2.2 Z hlediska ovlivnění výtisku

Ovlivnění výtisku při oddělení a vliv na výslednou kvalitu a vzhled je také důležité hledisko technologického srovnání. Obě technologie ovlivňují výtisk svými způsoby a navzájem jsou velice odlišné.

2.2.2.1 Pásová pila

U pásové pily je nejvýznamnější silové ovlivnění výtisku. Kvůli řezným silám působícím v řezném procesu může dojít k deformaci výtisku. Pokud jsou odřezávány tenkostěnné delikátní výtisky, je třeba minimalizovat řeznou sílu. Po úspěšném odříznutí takového výtisku však není vyhráno, pokud nezajistíme bezpečné vyjmutí z řezného prostoru,



Obr. 9: Výtisk s viditelným poškozením od pilového pásu

může výtisk spadnout níž a vzpříčit se do jiného odřezávaného dílu a může nastat úplná destrukce pilovým pásem. Na obrázku 9 je příkladová deformace a poškození výtisku. Dvě lopatky této vrtulky jsou ulomené úplně, další dvě jsou ohlé a na koncích silně zdeformované.

Maximální řezná síla působící na výtisk při řezání pásovou pilou se dá odhadnout z příkonu pily a řezné rychlosti. Pro motor s příkonem 2,2 kW při řezné rychlosti 125 m/min a celkovou účinností řezání 80 % by se podle rovnice 1 spočetla jako:

$$F_t = \frac{P_c \cdot \eta}{v_c} \cdot 60 = \frac{2200 \cdot 0,8}{125} \cdot 60 = 845 \text{ N} \quad (1)$$

Tato síla by se dále rozdělovala mezi jednotlivé zuby v záběru. Jiné způsoby ovlivnění se u pásové pily naštěstí neobjevují.

2.2.2.2 Drátořez

Proces elektroeroze u drátování žádné významné silové působení nevyvolává, elektrické výboje a přenos materiálu v místě řezu působí téměř neměřitelnými silami.



U drátořezu se ale objevuje jiná forma ovlivnění, a to je zbarvení odříznutého povrchu. Tento jev je dobře vidět na obrázku 8. Důvodem zbarvení povrchu je oxidace materiálu, způsobená nekvalitním dielektrikem nebo špatným nastavením procesu. Zbarvení povrchu bývá většinou dozlatova nebo dohněda. V některých případech může být toto zbarvení nežádoucí a je třeba ho odstranit. Toto lze provést buď chemicky, otryskáním, nebo jinou dokončovací metodou. V každém případě to je ale proces navíc, který může finální součást prodražit.

2.2.3 Z hlediska technologičnosti

Technologické možnosti a přípravy nutné pro provedení operace jsou u těchto dvou technologií také velice odlišné. Některé vlastnosti dokonce zasahují i do ekonomiky volby technologie, jak si ukážeme později.

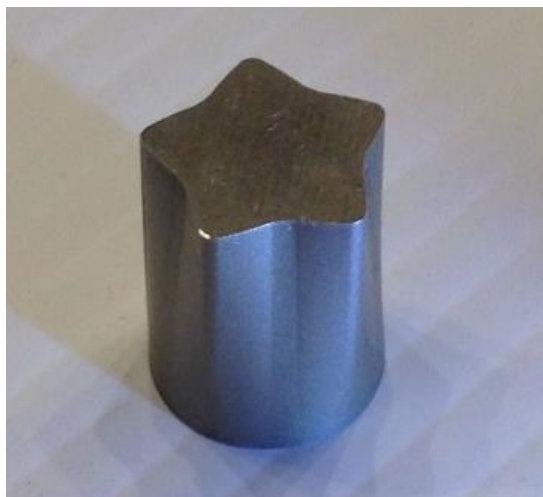
2.2.3.1 Pásová pila

Technologické možnosti pásové pily jsou velmi omezené. Pásová pila není schopná vytvořit žádnou složitou geometrii a je řeč tedy o 1D obrábění. Pomocí otočného svěráku se dá na dílenských pilách řezat pod úhlem maximálně 60° a tím zvýšit použití, ale u oddělávání výtisků to nijak nepomůže. Je ale třeba počítat s prořezem pilového pásu, který může být od 1,2 do 3 mm. To se projevuje při přípravě strojového kódu pro 3D tiskárnu, musí se vystavět dostatečný přídavek aby nedošlo ke zbytečnému poškození desky. Další pravidlo pro pilu plyne z předchozích řádků, kvůli silovému působení silového pásu. Pokud je jediná dostupná technologie právě pila, je třeba se vyhnout tenkým a křehkým částem, aby nedošlo k jejich poškození. Materiálová omezení pásové pily už dnes nemají, odříznou drtivou většinu materiálů. Pro optimální řezání se ale nelze vyhnout výměně pásu při přechodu řezání na jiný materiál.

Příprava pro odříznutí na pile je jednoduchá, v podstatě stačí základní desku zbavit co nejvíce přebytečného prášku a upnout.

2.2.3.2 Drátovačka

Protože je drátovačka komplexní, počítačem řízený stroj, má mnohem větší technologické možnosti. Po základních tříosých drátovačkách mohou být vybaveny i pěti řízenými osami pro 5D obrábění. Proti klasickým 5-osým obráběcím centrům ale jednu nevýhodu mají. Kvůli nástroji, což je vlastně napnutý kontinuální drát, dokážou obrábět



Obr. 10: Ukázková součást 5D obrábění na drátovačce [9]

pouze přímkové plochy. Toho se s výhodou využívá při výrobě přechodových ploch jako na obrázku 10. Pro potřeby oddělování výtisků se ale využívá maximálně 2D drátování. To se hodí v případě, je-li třeba odříznout výtisk po nějaké kontuře, čímž se dá vyhnout dalším úpravám výtisků, jako je třeba odstranění podpurných struktur. Materiálové omezení zde není prakticky žádné. Stačí, aby byl řezaný materiál vodivý. Řezací drát je univerzální pro všechny materiály. Navíc díky malému průměru drátu má drátovačka malý prořez v řádech desetin milimetru a technologický přídavek pro odříznutí nemusí být tak velký.

Technologická příprava je složitější než u pily a vyžaduje kvalifikovanou práci i několika osob. Jedná se o počítačem řízený stroj, takže prvním krokem je vytvoření strojového kódu. Pokud se jedná o nejjednodušší odříznutí po přímce, dá se tento jednoduchý program napsat přímo na stroji. Stroj je ale třeba před samotnou prací řádně seřídit a nastavit správné parametry řezu.

2.3 Ekonomické srovnání drátořezu a pásové pily

Dnešní doba diktuje ekonomickou optimalizaci a co největší snížení nákladů. Zároveň je důležitý i čas výroby, který by měl být co nejmenší. Z tohoto hlediska jsou opět rozdíly mezi pásovou pilou a drátořezem obrovské. Všechny ceny a časy v tomto srovnání jsou pouze orientační či hrubé odhady a platí pro základní desku o rozměru 250x250 mm.

2.3.1 Z hlediska ceny oddělení

Porovnání ceny těchto dvou technologií může být bráno z několika pohledů. Ne každá firma s DMLS 3D tiskárnou má totiž k dispozici svou vlastní drátovačku. Nejen že má vysoké pořizovací náklady, ale zároveň by v provozu 3D tiskáren nebyla dostatečně vytížená. Pila sice nemá tak vysoké pořizovací náklady a většině firem nedělá problém si jí pořídit, ale pořád by tu mohl být problém s vytížeností či prostorem. Pokud firma nemá k dispozici své vlastní stroje, posílá dílce na oddělení v kooperaci do jiných firem. Proto existují čtyři scénáře, které budou použity i pro časové hledisko:

1. Pila ve firmě
2. Pila v kooperaci
3. Drátovačka ve firmě
4. Drátovačka v kooperaci

U obou scénářů s pilou je důležité předem dodat, že kvůli vystavění vyššího technologického přídatku budou větší náklady na tisk samotný, časové i materiálové. Při tisku zlata tak logicky určitě nebude zvolena pásová pila.

2.3.1.1 Pila ve firmě

Asi nejjednodušší ekonomickou formou je pila na dílně. Zároveň vychází i jako nejlevnější, díky nízkým pořizovacím nákladům. Ceny specializovaných pil pro odřezávání výtisků se pohybují od 200 000 do 1 200 000,- Kč. Díky relativně velkému časovému fondu těchto strojů, jejich spolehlivosti a jen občasné výměně pilového pásu se cena za odříznutí výtisků z jedné desky pohybuje v řádu stokorun.

2.3.1.2 Pila v kooperaci

Při outsourcingu služeb pásové pily můžeme čekat přibližné zdvojnásobení nákladů kvůli nutné marži firmy. Pokud se připočtou ještě náklady na přepravu zboží a nějakou tu byrokracii, je výsledkem číslo okolo 500,- korun za desku.

2.3.1.3 Drátovačka ve firmě

Může být výhodou pro svou okamžitou dostupnost a kvalitu odřezávání, ale provázejí ji vysoké pořizovací náklady okolo 3 000 000,- Kč a nutnost dalšího drahého vybavení včetně kvalifikované obsluhy. Aby však byla ve firmě ekonomicky výhodnější, musela by mimo řezání výtisků také pracovat pro zakázkovou výrobu. Pak by se pohybovala jednotková cena nad hranicí 1 000,- Kč za desku.



2.3.1.4 Drátovačka v kooperaci

Ale protože by se drátovačka bez zakázkové výroby ve firmě zaměřené na 3D tisk kovů neuzivila, řeší to většina firem kooperací. Zde mám k dispozici i konkrétní číslo, kdy nejmenovaná firma zaplatila za oddělení výtisků ze 7 palet celkem 16 300,- korun. Po vydělení vychází drátořez v kooperaci na cca. 2 300,- Kč za desku.

2.3.2 Z hlediska času oddělení

Čas odříznutí výtisků může být v průmyslovém procesu také důležitý, obzvláště ve světě prototypingu, kde je po 3D tisku hlad. Zároveň tu jsou obrovské rozdíly mezi odříznutím přímo ve firmě a v kooperaci. Budu se řídit stejnými scénáři jako v předchozí kapitole.

V případě pily pak opět kvůli vysokému prořezu je třeba počítat s časem potřebným pro vystavění technologického přídavku, který se v případě plné desky může vyšplhat na několik hodin.

2.3.2.1 Pila ve firmě

Zde je situace velmi jednoduchá. Seřízení a nastavení stroje je během chvilky a celá deska může být odříznutá do 20 minut včetně přípravy.

2.3.2.2 Pila v kooperaci

Pokud rozhodnutí padne na zakázkové odříznutí, je nutné počítat s dobou dodání, která se bude lišit podle vytíženosti firmy. Pro pásové pily nebude tato lhůta nijak drastická, nicméně minimálně dva dny včetně započítání přepravy je zdravý odhad.

2.3.2.3 Drátovačka ve firmě

Kvůli složitému nastavení a seřízení stroje a samotnému procesu řezání je doba potřebná pro odříznutí na drátovačce přítomné ve vlastní výrobě ve srovnání s pilou ve firmě několikrát delší. Konkrétně se vyšplhá asi na 4 hodiny na desku.

2.3.2.4 Drátovačka v kooperaci

Největší čas uběhne při volbě této možnosti. Kvůli frontám se může čekání na odříznutí protáhnout až na 14 dní, i když normální dodací lhůta je spíš týden.



2.4 Přehled výrobců a konkrétních strojů pro odřezávání výtisků

Komerční řešení tohoto problému nejsou příliš častá, i tak se ale najde několik výrobců strojů specializovaných na tuto operaci. V případě drátořezů je situace jiná než u pásových pil, protože není třeba žádných speciálních úprav stroje. Naproti tomu pásové pily musí být uzpůsobené přímo pro upínání základních desek.

Kvůli nutné specializaci pil a relativně malému trhu není v prodeji mnoho variant. Stupeň automatizace těchto pil je většinou malý a jedná se převážně o dvousloupové poloautomaty. Naopak drátořez lze použít libovolný a jejich stupeň automatizace je vyšší.

Uvedené stroje jsou pouze výběr z trhu a nemusí obsahovat všechny možnosti. Ceny strojů jsou založené na předchozích prodejích, nebo se jedná o nabídkovou cenu zastupujících firem.

2.4.1 SODICK VL400Q

Prvním zástupcem elektroerozivních drátořezů je SODICK VL400Q (obrázek 11). Řada VL je základní, ekonomická řada výkonných EDM drátovaček od tohoto výrobce. Stroj je postaven na lineárních pohonech, které zajišťují výbornou přesnost. V této řadě jsou i větší stroje, ale pro potřeby oddělování výtisků svými parametry bohatě stačí základní VL400Q. Pro provoz stroje a dosažení optimálních obráběcích výkonů je nutné udržovat teplotu okolí na 22°C +/- 2°C. Cena tohoto stroje je 110 000€, což je při kurzu 25,8 Kč/EUR docela příjemných 2 838 000,- korun. České zastoupení strojů SODICK v současné době zajišťuje firma Zenit s.r.o. [10]



Obr. 11: SODICK VL400Q [10]

Tabulka 2: Vlastnosti stroje SODICK VL400Q [10]

Pojezd os X,Y,Z	400x300x220 mm	Způsob obrábění	Koaxiální výplach/zaplavený
Pojezd os U,V	80x80 mm	Velikost cívky	8 kg
Max. hmotnost obrobku	500 kg	Rozměry stroje	2020x2310x1990 mm
Obrábění pod úhlem (pracovní výška 120 mm)	+/- 15°	Zastavěný prostor	2700x3080 mm
Rychlost drátu	420 mm/sec	Hmotnost stroje	2750 kg
Tah drátu	3 – 23 N	Objem kapaliny	590 l
Průměr drátu	0,1 – 0,3 mm	Filtrace	2 vyměnitelné papírové filtry

2.4.2 FANUC ROBOCUT α -C600iA

Další drátovačka je od japonské firmy FANUC (obrázek 12), kteří jsou známí také svými obráběcími centry. Jedná se o novou modelovou řadu, která je oproti předchůdci kompaktnější, má vylepšený generátor a s ním související lepší dosažitelné hodnoty. Model α -C600iA je prostřední model této řady, k dispozici jsou ještě modely α -C400iA a α -C800iA. Výhodou může být velice rychlé navlékání drátu do 10s a nejnižší provozní náklady ve své třídě. České zastoupení zajišťuje firma Penta trading s.r.o. a cena tohoto stroje je dle aktuální nabídky 130 000€, v přepočtu 3 354 000,- korun.



Obr. 12: FANUC ROBOCUT α -C600iA [11]

Tabulka 3: Vlastnosti stroje FANUC ROBOCUT α -C600iA [11]

Pojezd os X,Y,Z	600x400x310 mm	Způsob obrábění	Koaxiální výplach/zaplavený
Pojezd os U,V	200x200 mm	Velikost cívky	16 kg
Max. hmotnost obrobku	1000 kg	Rozměry stroje	2440x2740x2160 mm
Obrábění pod úhlem (pracovní výška 120 mm)	+ 30°	Zastavěný prostor	2840x3140 mm
Rychlost drátu	250 mm/sec	Hmotnost stroje	3000 kg
Tah drátu	2,5 – 25 N	Objem kapaliny	950 l
Průměr drátu	0,1 – 0,3 mm	Filtrace	2 vyměnitelné papírové filtry

2.4.3 KLAEGER bitron300 3D

Jako první ze specializovaných pil bude uvedena pila německého výrobce KLAEGER (obrázek 13). Je uzpůsobená pro upínání dvou běžných velikostí desek: 90x90 mm a 250x250 mm. Maximální řezná plocha je však až 300x300 mm. Jedná se o dvousloupový automat se servopohonem přísuvu a odměřováním polohy řezu. Jako třešničkou na dortu může být speciálně vyvinuté odsávání prášku. Motor o výkonu 3 kW roztáčí pás až na maximální řeznou rychlost 100 m/min. Celý stroj váží 900 kg a je postaven na základu pily bitron300 s použitím vlastního řídicího systému. [12]



Obr. 13: KLAEGER bitron300 3D [12]

2.4.4 KASTO KASTOwin amc

Tato plně automatická pila (obrázek 14) je to nejpokročilejší řešení odřezávání výtisků. Je k tomuto účelu prvoplánově zkonstruovaná a obsahuje spoustu unikátních konstrukčních řešení. V základním provedení upne standardní desky o velikosti 250x250 mm a 400x400 mm a ostatní desky na vyžádání (až do rozměru 500x400 mm). 4 kW motor zajistí rozsah řezných rychlostí od 12 do 150 m/min. Celá pila je kompletně zakrytována a má oddělený pracovní prostor se speciálním otočným ramenem pro upínání. To je přítomno pro pohodlnější upínání desek, protože celý řezný proces probíhá vzhůru nohama a odříznuté výtisky tak padají přímo do připraveného vozíku s výstelkou. Tím se eliminuje riziko vzepření odříznutého výtisku při řezání další součásti, jak bylo popsáno v kapitole o ovlivnění výtisku. Pila je připravena pro připojení externího vysavače prášku, což je jeden z cílů této práce a řešení firmy KASTO se mi velice líbí. Distributor strojů KASTO je pro Českou republiku firma PROKA CZ s.r.o. a základní cena této pily je 51 900€, v přepočtu 1 339 020,- Kč. Jedná se tedy jistě o nejdražší pilu tohoto výběru, ale tomu odpovídá i stupeň automatizace a počet funkcí. [13]



Obr. 14: KASTO KASTOwin amc [13]

2.4.5 Pilous ARG 300 3D

Poslední stroj tohoto výběru a zároveň pila, kterou se bude dále tato práce zabývat je Pilous ARG 300 3D (obrázek 15). Jedná se o nejzákladnější a také nejlevnější stroj tohoto výběru a je vhodný pro firmy s nízkým počtem 3D tiskáren. Jak již bylo řečeno, pila byla speciálně vyvinuta ve spolupráci firem Pilous s.r.o. a Metal 3D s.r.o.. Tato pila české výroby se vyznačuje dvousloupovou konstrukcí s poloautomatickým řízením pomocí hydraulického agregátu zvedající masivní rameno. Upínání je jako u ostatních pil řešeno pomocí čtyř šroubů a pro nastavení hladiny řezu je na pile ruční klička s pohybovým metrickým šroubem. Oproti konkurenci chybí příprava na odsávání prášku. Z předchozích dvou vět plynou cíle této práce a mé další směřování. Parametry tohoto stroje jsou v porovnání s konkurencí trochu horší, ale dostačující. Hlavní motor pohánějící pilový pás má výkon 2,2 kW a frekvenční regulátor pro rozsah rezných rychlostí 15 – 125 m/min. Upínání je uzpůsobeno pouze pro desky o rozměru 250x250 mm. Cena této pily je přibližně 200 000,- korun. [14]



Obr. 15: Pilous ARG 300 3D [14]

2.5 Zhodnocení

Obě technologie jsou vhodné pro oddělování výtisků od základní desky a každá z nich má unikátní vlastnosti, díky kterým se předurčuje případ použití. Celkově jako nejeekonomičtější vychází pásová pila díky nízkým počátečním nákladům a rychlosti odříznutí. Specializované pily pracují navíc s přijatelnou přesností a nezanechávají extrémně nevzhledný povrch. Vysoký stupeň automatizace stroje KASTOwin amc pak umožňuje jejich nasazení do výroby pro vysokou produktivitu s několika moderními 3D tiskárnami. Neznamená to však, že ve světě 3D tisku nemají drátořezy své místo. Naopak, jsou tady pro případ, kdy je třeba opravdu přesného řezu, nebo pro velice křehké a malé součásti. Pokud se firma však rozhoduje pro koupi stroje na oddělování, dá velice pravděpodobně přednost pásové pile před drátovačkou.

Jako motivace pro zvážení koupě pásové pily by pak pro firmy mohl být výpočet návratnosti investice v rovnici 2. Jako příkladovou situaci volím firmu se dvěma tiskárnami, jejichž produkce činí celkem 7 vystavěných palet týdně. Jako cenu kooperačního oddělení na drátovce použiji 2 300,- Kč za desku a investice bude do pásové pily Pilous ARG 300 3D.

$$t_n = \frac{N_p}{n \cdot (N_k - N_v)} = \frac{200\,000}{7 \cdot (2300 - 200)} = 13,6 \text{ týdně} \quad (2)$$

Kde t_n je čas návratnosti investice v týdnech, N_p jsou pořizovací náklady stroje, n je počet odřezávaných desek týdně, N_k je jednotková cena na odříznutí v kooperaci a N_v je jednotková cena v případě vlastního odříznutí na pile.

Jak je vidět, investice do pásové pily se v případě příkladové situace vrátí do 14 týdnů, což se opravdu vyplatí. Nejen že další oddělování bude generovat vyšší zisk, ale je tu i benefit okamžité dostupnosti stroje ve výrobě a s tím spojená minimální čekací doba. V tabulce 4 je přehledné porovnání obou technologií ve všech důležitých směrech jakožto shrnutí minulých kapitol.

Díky provedení konstrukčních úprav se zvýší funkčnost pily ARG 300 3D a přiblíží se více specializovaným strojům jako KASTOwin amc při zachování nízké pořizovací ceny. To povede k vyšší konkurenceschopnosti a následným vyšším prodejům tohoto stroje.

Tabulka 4: Celkové porovnání technologií drátořezy a pásové pily

Kategorie	Pásová pila	Drátořez
Složitost procesu	Nízká	Vysoká
Nejlepší dosažitelná přesnost	0,502 mm	0,001 mm
Nejlepší dosažitelný povrch	Ra 12,5	Ra 0,1
Silové ovlivnění výtisku	Deformace tenkých stěn	Žádné
Chemické ovlivnění výtisku	Žádné	Mírná oxidace povrchu
Prořez	Min. 1,2 mm	0,2 mm
Technologické možnosti	1D obrábění	5D obrábění
Jednotková cena oddělení	200,- Kč	1 200,- Kč
Jednotkový čas oddělení	20 minut	4 hodiny
Pořizovací náklady	200 000,- Kč	3 000 000,- Kč
Materiálová omezení	Žádná	Pouze vodivé materiály

3 Vlastní řešení

V této části bude proveden a popsán návrh vlastního řešení jednotlivých problémů uvedených v úvodu této práce. Návrhy budou podpořeny potřebnými funkčními schémata a příslušnou 3D vizualizací.

3.1 Návrh systému upínání

Původní myšlenka upínání pomocí hydraulického/pneumatického systému byla rozšířena o permanentní magnet, který lze využít v případě upnutí desky z feromagnetického materiálu, a excentrické upínací šrouby, které vynikají upínací silou a rychlostí upnutí při zachování malých rozměrů a jednoduchosti konstrukce.

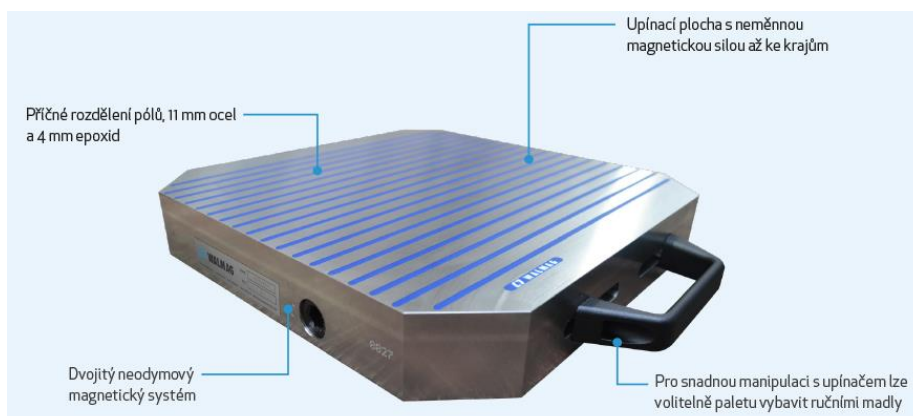
Pro upnutí základních desek jsou tedy v návrhu 4 způsoby:

- 1) Permanentní magnet
- 2) Hydraulické upínání
- 3) Excentrické šroubové upínky
- 4) Původní řešení- 4 šrouby.

3.1.1 Magnetické upínání v kombinaci s původním řešením

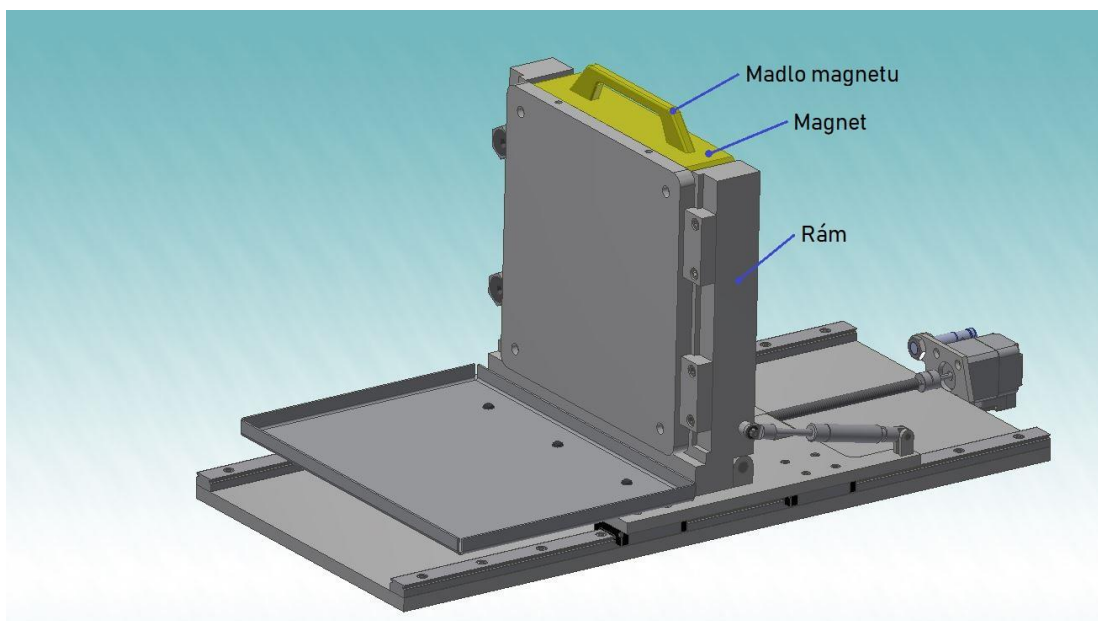
Volba magnetické upínací desky měla následující parametry: čtvercový půdorys o rozměrech příslušných základní desce, upínací síla $>100 \text{ N/cm}^2$, permanentní magnetická deska s aktivačním prvkem.

Byl zvolen magnetický upínač Walmag Neomill Compact paleta ve velikosti 240x240 mm. Mezi jeho vlastnosti patří robustní (pro tuto aplikaci možná až příliš) a voděodolná konstrukce, přebroušení plochy až o 10 mm, upínací plocha s konstantní silou až ke krajům, minimální velikost obrobku 15 x 15 x 6 mm, volitelná madla, přepínací klíč součástí balení a další (viz. obrázek 16). [15]



Obr. 16: Magnetický upínač Walmag Neomill Compact paleta. [15]

Magnet bude pomocí montážních otvorů připevněn k rámu, na kterém budou umístěny i ostatní upínací prvky. Do magnetu budou zároveň vyřezány závitové otvory pro původní řešení pomocí utažení 4 šroubů. Na obrázku 17 je znázorněna konstrukce



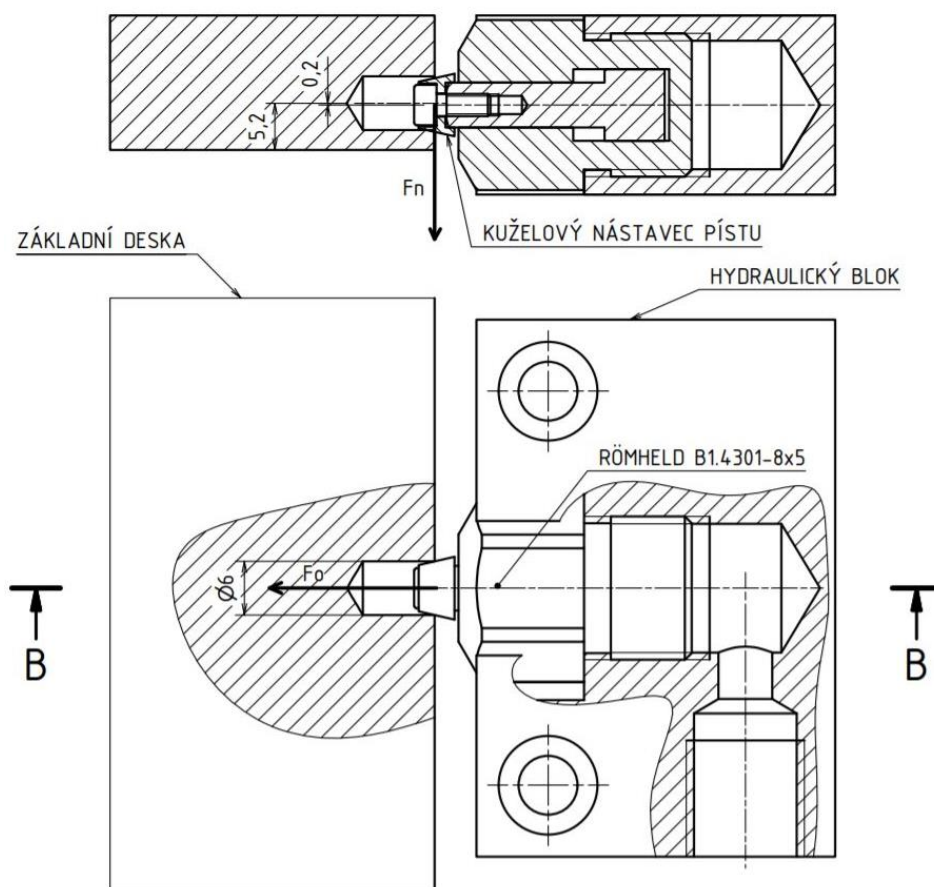
Obr. 17: 3D vizualizace konstrukce upínání s využitím magnetu

s magnetem (žlutě) a rámem pro uchycení.

3.1.2 Hydraulické upínání

Pro hydraulické upínání jsme byly zvoleny malé hydraulické válce tak, aby jejich výška

B-B



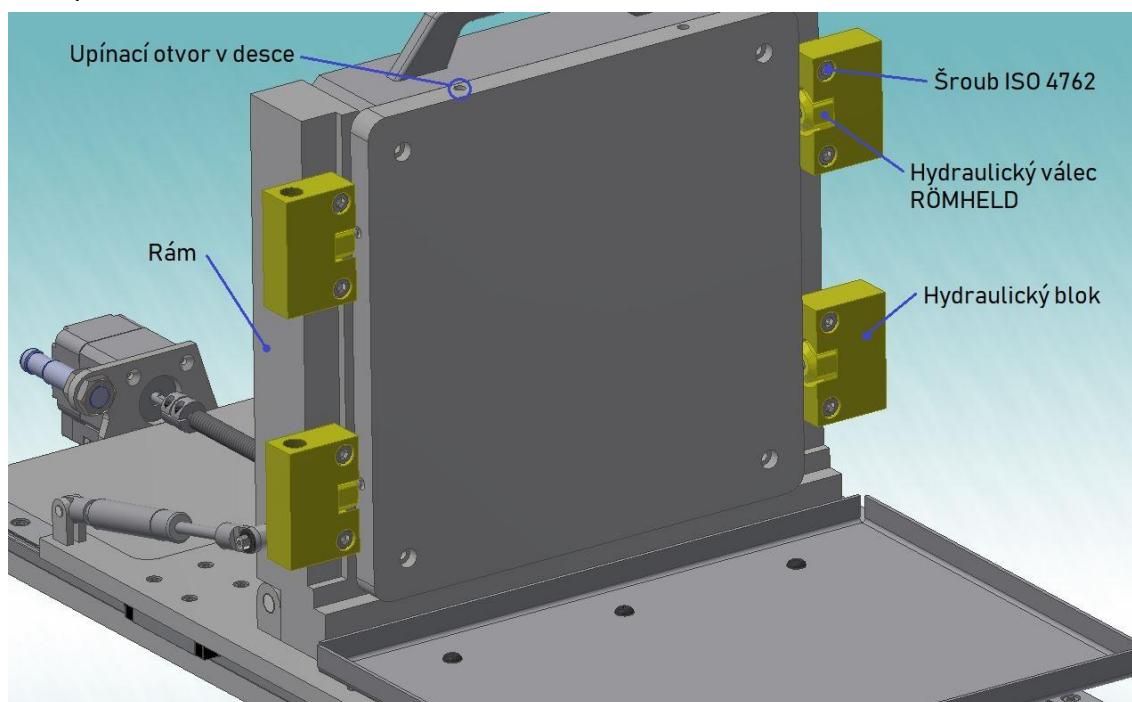
Obr. 18: Schéma hydraulického upínání

nepřesáhla rovinu upínané základní desky o minimální tloušťce 15 mm. Nejlépe pro tento případ vycházely hydraulické válce ve tvaru šroubení s pružinovým návratem od firmy Römheld. Jedná se o velice kompaktní válec, v nejmenším provedení má píst průměr 5 mm a šestihran pro utažení má pouze 19 mm.

Princip upnutí využívá kuželové násady na píst a vyosené válcové díry. Díky vyosení bude mimo síly stabilizující pohyb desky vyvozována i síla kolmá na desku. Na obrázku 18 je schéma takového řešení včetně směru sil působících na desku. Velikost těchto sil bude vypočtena ve výpočtové části této práce.

Hydraulické válce ve tvaru šroubení jsou přišroubovány do rozvodného bloku s kanálkem pro přívod tlaku do válce a závitem G ¼ pro šroubení standardní velikosti. Blok je přišroubován na stejný základní rám s magnetem pomocí dvou šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem ISO 4762 M6x20-8.8. Bloky jsou na rámu celkem 4, vždy dva působící proti sobě a celý systém využívá zabudovaný hydraulický agregát s pracovním tlakem 40 bar. Jsou umístěny symetricky a základní deska má otvory na všech 4 stranách, díky čemuž nezáleží na orientaci desky. Obrázek 19 obsahuje 3D reprezentaci návrhu hydraulického upínání, žlutě jsou zvýrazněny hydraulické bloky a válce. Rozvodný systém hydrauliky není součástí této práce.

Levnějším řešením by bylo nahrazení jedné strany válců pouze opěrnými trny též s kuželovým prvkem, ale kvůli nízkému zdvihu by vzniknul pouze minimální prostor pro manipulaci s deskou.

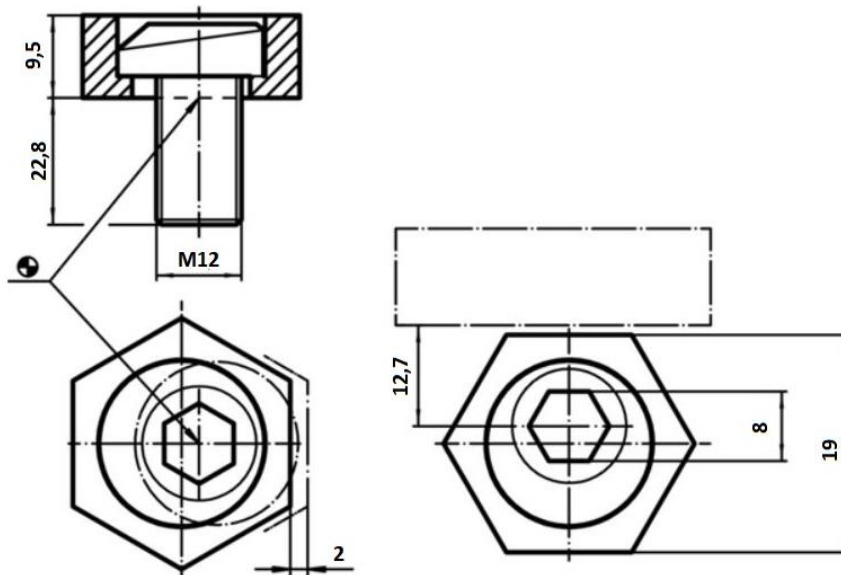


Obr. 19: 3D reprezentace konstrukce hydraulického upínání

3.1.3 Excentrické upínací šrouby

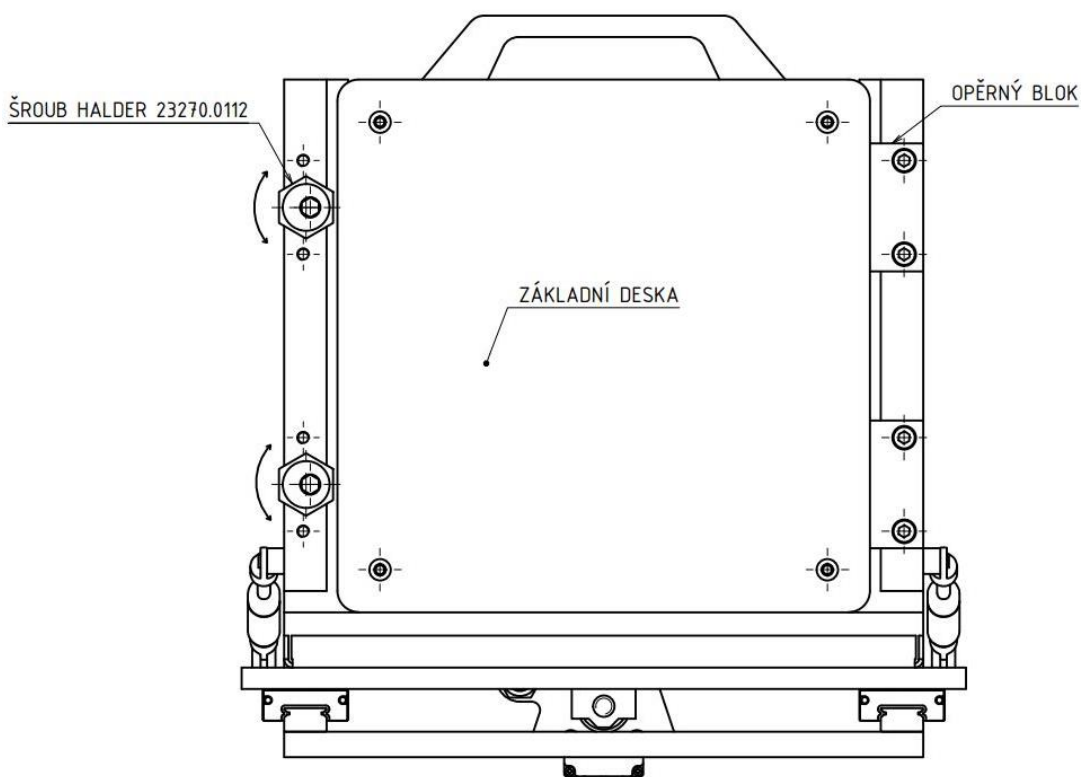
V případě, že z nějakého důvodu nebude možné využít hydraulického upínání, je zde i možnost excentrických šroubových upínek, kterými lze nahradit hydraulické bloky. Ty jsou dvě a silově působí proti opěrným blokům na opačné straně. Opět je řešení

symetrické a umístění opěrných bloků a upínek je na uživateli. Opěrné bloky mají stejné montážní otvory jako hydraulické bloky, není třeba dalších otvorů. Excentrické upínací



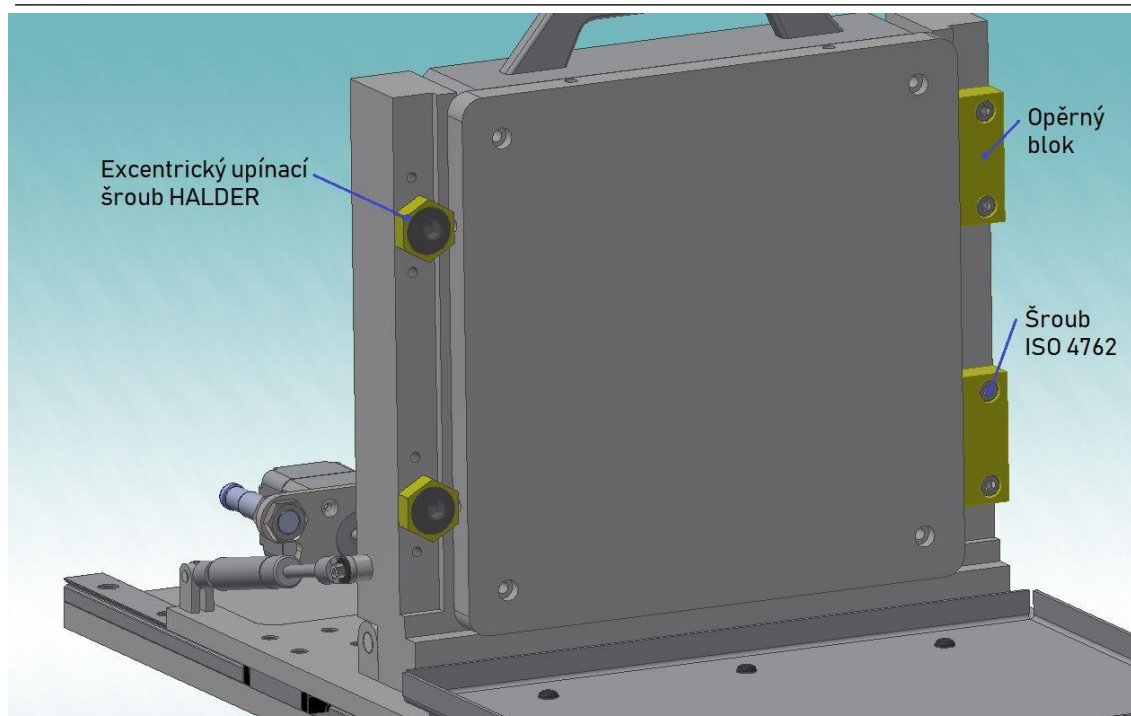
Obr. 20: Tvar a rozměry excentrického upínacího šroubu Halder 23270.0112 [16]

šrouby Halder 23270.0112 M12 mají maximální upínací sílu 9 kN, bohužel ale nevzniká síla kolmá na desku. Jejich hlavní výhoda je rychlé upnutí, stačí pootočit šroubem o max. 180°. Tvar a rozměry takového šroubu jsou na obrázku 20, čelní pohled na takto řešené upínání na obrázku 22 a 3D reprezentace na obrázku 22, kde jsou opět žlutě zvýrazněny



Obr. 21: Čelní pohled na systém excentrického upínání

nejdůležitější prvky. Díky nízké výšce hlavy šroubu lze takto upínat i desky o menší tloušťce, až do 10 mm.



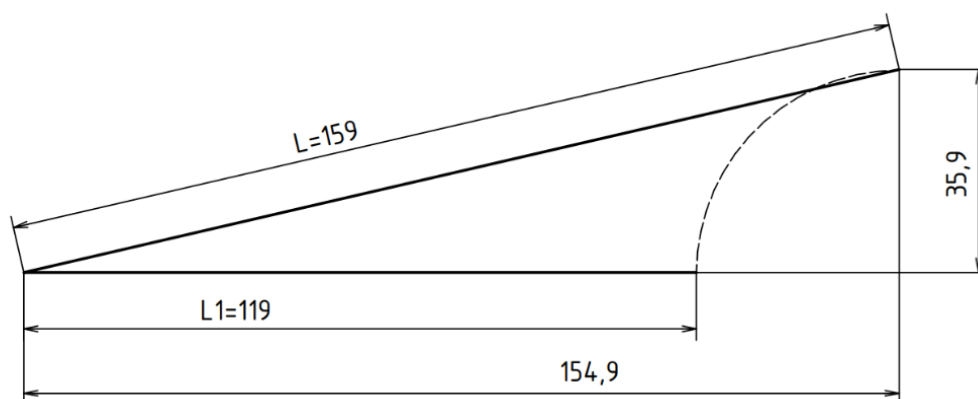
Obr. 22: 3D pohled na excentrické upínací šrouby

3.2 Návrh sklápění desky do horizontální polohy pro snadnější manipulaci

Sklápění desky do horizontální polohy bylo vyřešeno pomocí masivního čepu a dvou pomocných plynových vzpěr. Rám, ve kterém je umístěný magnet a na kterém jsou i ostatní upínací systémy má ve své spodní části přesný otvor pro čep. Další základny čepu jsou pak na spodní desce, která je součástí lineární osy.

Pro zvedání desky je magnet vybaven volitelným ergonomickým madlem. Funkce plynových vzpěr je dvojitá – asistují svou tlačnou silou při zvedání desky do vertikální polohy a zároveň slouží jako aretace proti vychýlení desky při řezu.

Plynové vzpěry byly zvoleny model RS 5487 od Essentra components, konkrétně jeho nejmenší varianta s průměrem pístu 6 mm, zdvihem 40 mm a vysunutou délkou 115 mm. Tlačná síla takové vzpěry je 400 N, nastavitelná v rozmezí ± 20 N. Protože jsou



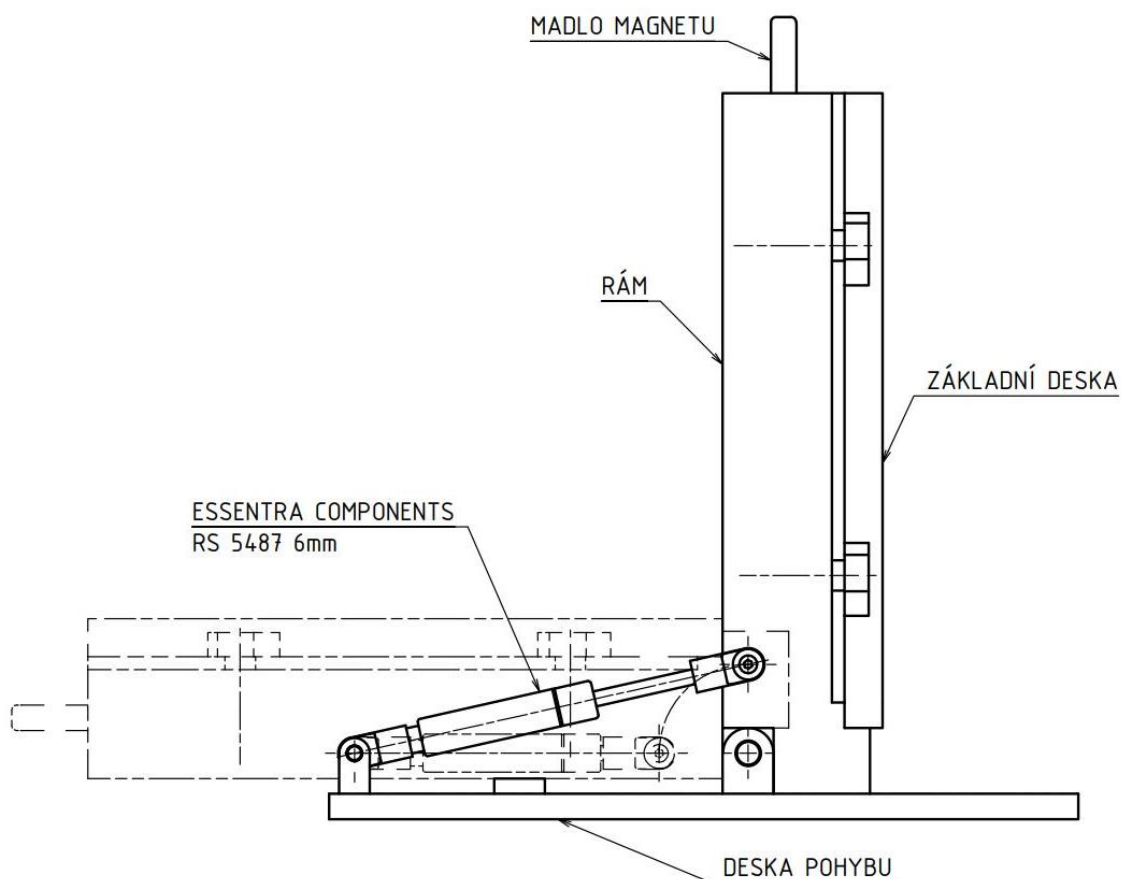
Obr. 23: Kinematické schéma zvedání rámu

vzpěry dvě, vytvářejí ve zdvihnuté poloze dostatečný silový účinek, aby nebylo třeba další aretace. Tato skutečnost bude podložena výpočtem.

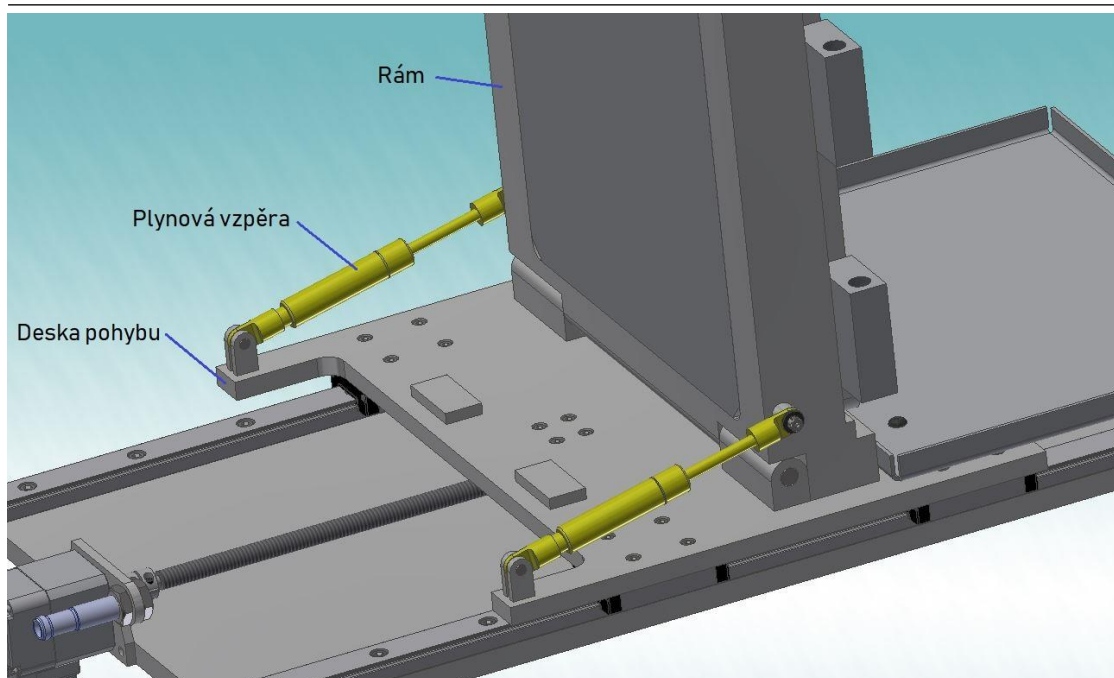
Pro hodnoty zdvihu a délky při maximálním vysunutí byla podle kinematického schématu sklopení vypočtena maximální dovolená poloha čepu na rámu, aby bylo dosaženo maximálního možného stabilizačního účinku.

Na obrázku 23 je znázorněno zmíněné kinematické schéma pro rozměry se započítanými montážními oky. Rozměr L1 značí délku vzpěry v zasunutém stavu, L značí vzpěru ve vysunutém stavu a čárkovaný oblouk znázorňuje trajektorii vysouvání vzpěry. Nejoptimálnější rozměry umístění čepů na rámu a desce pohybu jsou tedy 35,9 mm na rámu a 154,9 mm na desce. Protože je snaha se vyhnout krajním polohám vzpěry, jsou tyto hodnoty upraveny na 35 mm a 155 mm.

Obrázek 24 pak obsahuje vizualizaci zvedání desky se zobrazením krajních poloh a na obrázku 25 je 3D pohled na mechanismus zvedání, plynové vzpěry jsou zvýrazněny žlutě.



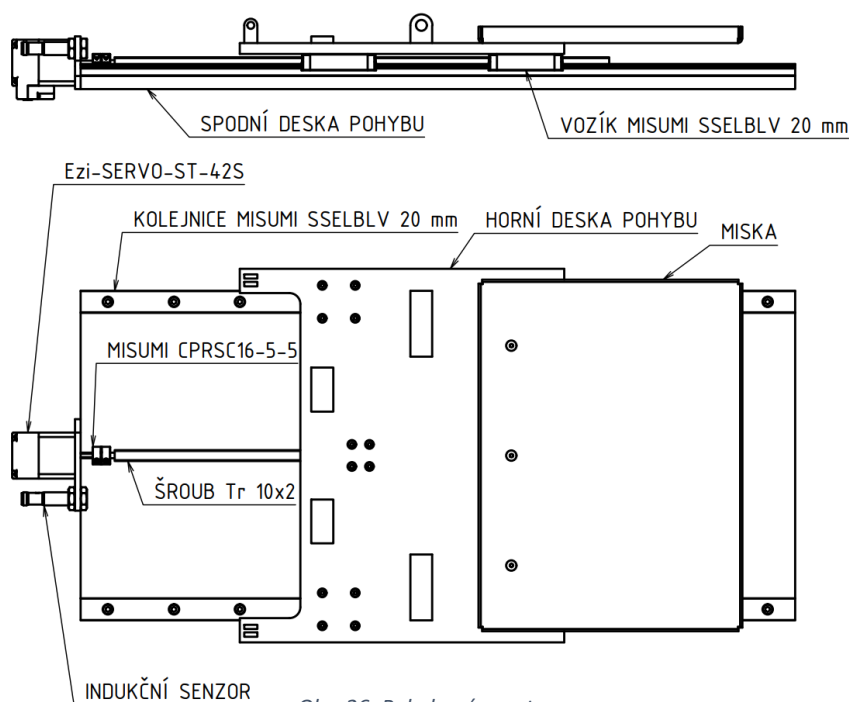
Obr. 24: Vizualizace sklápění



Obr. 25: 3D pohled na mechanismus zvedání pomocí plynových vzpěr

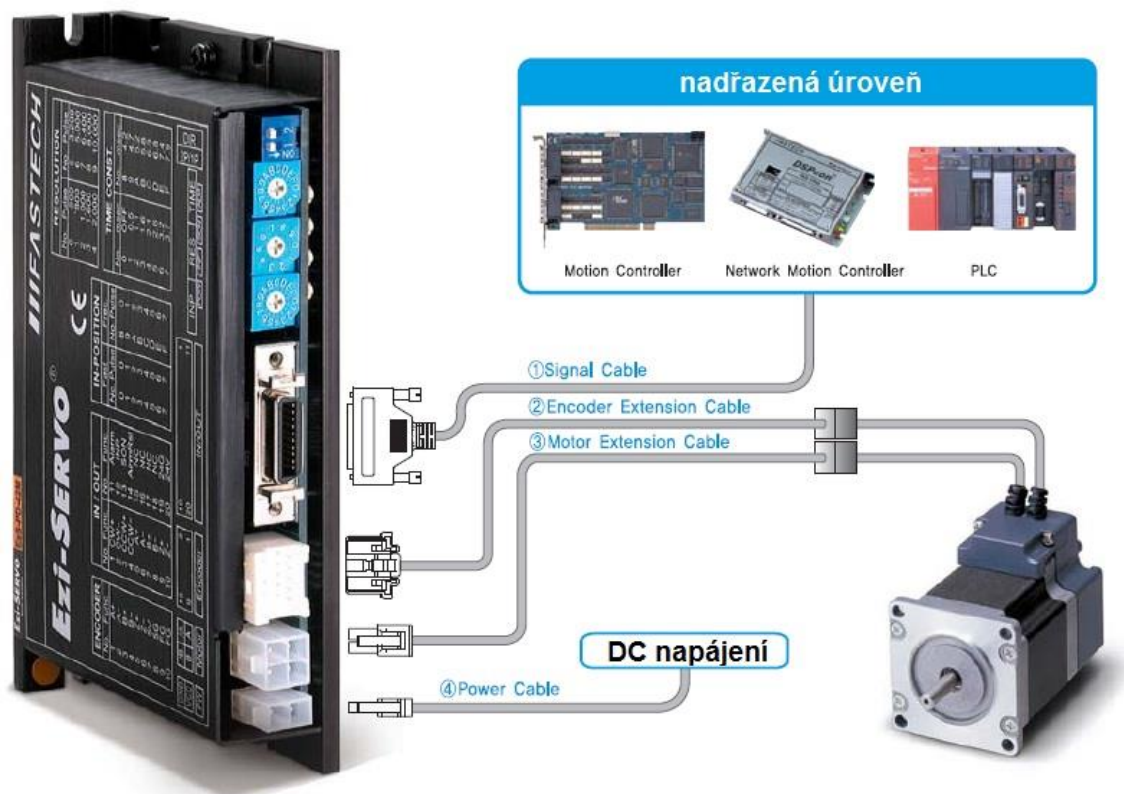
3.3 Návrh nastavení výšky řezu (lineární osa)

Jako základ celé lineární osy bylo zvoleno 20 mm lineární vedení MISUMI SSELBLV. V návrhu jsou použity dvě kolejnice o délce 650 mm se dvěma vozíky na každé z nich. Vzhledem k malým osovým silám působících ve směru pohybu byl zvolen pohybový šroub Tr 10x2, který je pomocí spojky MISUMI CPRSC16-5-5 připojen k motoru Ezi-SERVO-ST-42S se zabudovaným snímačem zpětné vazby a externím driverem. Pro nastavení referenčního bodu je připraven indukční snímač. Díky této kombinaci lze dosáhnout přesného nastavení výšky řezu s přesností do desetin milimetru.



Obr. 26: Pohybová soustava

Řízení motoru probíhá podle schématu zapojení na obrázku 27 dle výrobce. K motoru je dodáván driver, který je napájený stejnosměrným napětím z pily. Do motoru z driveru vedou dva kabely, jeden pro snímání aktuální polohy a druhý pro samotný pohyb motoru. Instrukce pro driver pak bude vydávat PLC počítač, ovládaný dále přes ovládací panel umístěný u ostatních ovládacích prvků na pile. Pro vizualizaci byl proveden návrh příkladového ovládacího panelu, jehož vzhled je čistě orientační. Návrh PLC počítače a kompletní zpracování ovládacího panelu není součástí této práce.



Obr. 27: Schéma zapojení ovládání motoru [26]

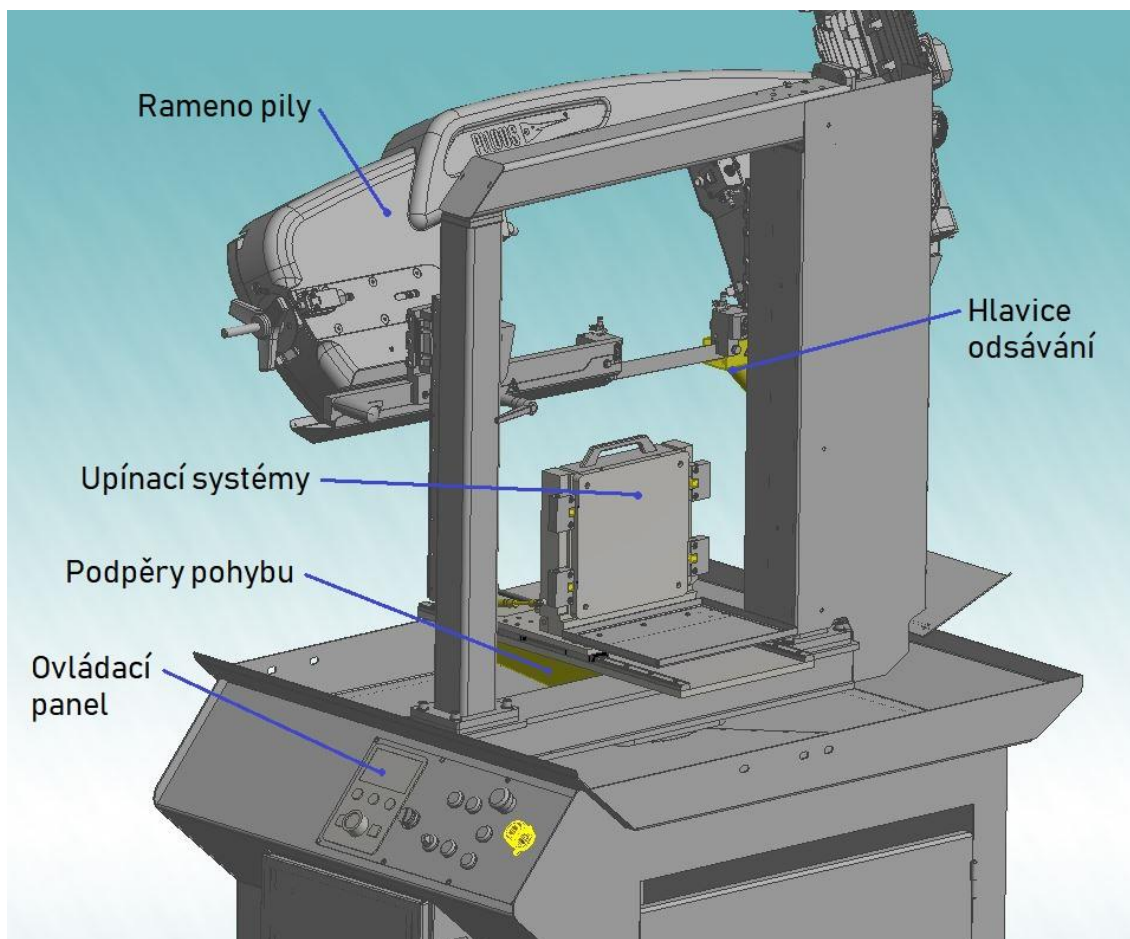
Délka celé osy pak umožňuje řezání i v několika úrovních, například pro výtisky naskládané v několika vrstvách při jedné stavbě. Díky tomu lze lépe využít strojní čas tiskárny a zvýšit produktivitu. Mimo řezání v několika úrovních to zároveň znamená možnost upnutí extrémně silných desek, rozsah nastavení mého řešení je 200 mm od magnetu. Další využitelná délka osy je ve směru vpřed, aby si obsluha mohla upínání co nejvíce přiblížit pro snadné sklápění.

Kolejnice jsou pomocí připravených otvorů připevněny na spodní desku pohybu. Na vozíky je pak přišroubovaná horní deska pohybu, stejně tak jako samomazná matice pohybového šroubu. Horní deska pak dále obsahuje montážní prvky sklápění – držák čepu a oka pro plynové vzpěry. Zároveň je zde přichycena plechová miska pro třísky a odříznuté výtisky. Jako doporučení je uvedeno použití ochranných měchů pro lineární vedení, protože miska neposkytuje dostatečnou ochranu od třísek a mohlo by dojít ke snížení životnosti.

Celá tato sestava je na pile umístěna místo původního řešení. Nejprve jsou přivařeny podpěry pohybu k nosníku rámu dvousloupové konstrukce, které obsahují dvě díry se

závitem. Spodní deska se pak přišroubuje k takto připravené konstrukci, využívá u toho navíc čtyři již existující otvory.

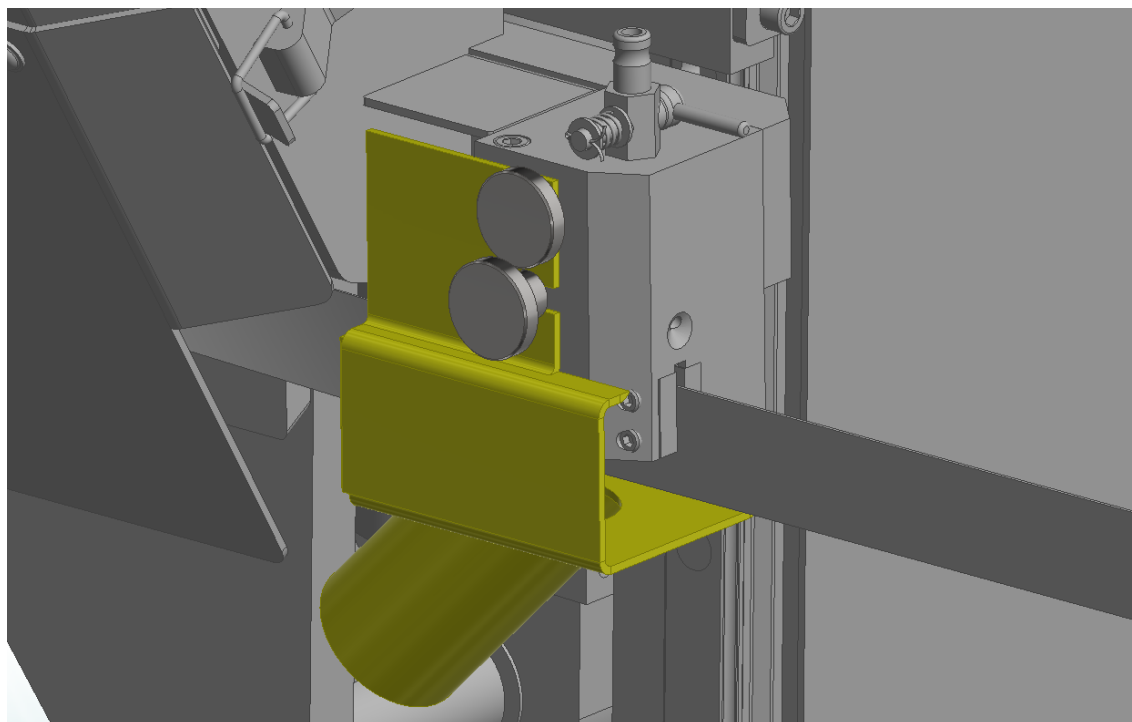
Na obrázku 26 je zobrazen nákres pohybové soustavy a na obrázku 28 je znázorněno umístění celé pohybové soustavy v rámci pásové pily, žlutě jsou v tomto případě znázorněny podpory pohybu.



Obr. 28: Umístění pohybové soustavy v rámci pily

3.4 Návrh odsávání zbytkového prášku a třísek z místa řezu

Při návrhu odsávacího modulu bylo myšleno hlavně na jednoduchost. Stroj nebude vybaven vlastní odsávací jednotkou, ale bude připojen na externí vysavač speciálně určený pro tuto aplikaci. Čelo stroje bude obsahovat výřez s nástavcem na hubici vysavače, ze které bude veden rozvod sání strojem až k odsávací hlavici.

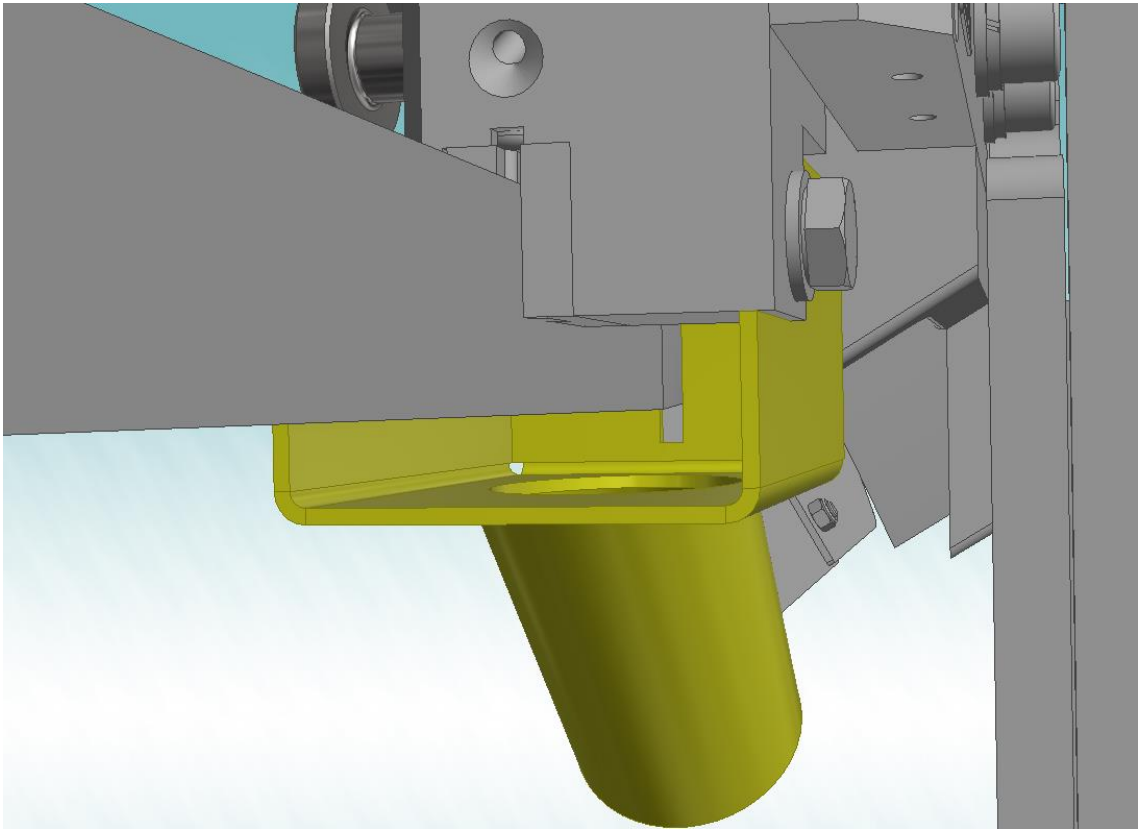


Obr. 29: Odsávací hlavice a knoflíkové šrouby

Odsávací hlavice byla vhodně umístěna místo jednoho z původních krycích bezpečnostních plechů i s využitím původních montážních otvorů. Hlavice je připevněna na vodícím bloku pilového pásu pomocí dvou rýhovaných knoflíkových šroubů DIN 464 a DIN 653 pro snadné povolení. Důvodem volby dvou různých knoflíkových šroubů je prostorové omezení, šrouby stejného typu by kolidovali hlavami. Kvůli potřebě rychlé výměny pilového pásu musí být řešení také jednoduše demontovatelné, dále zdůvodňující volbu knoflíkových šroubů. Po jejich povolení lze hlavici posunout až o 10 mm a umožnit tak její snadné vyjmutí. (hlavice žlutě na obr. 29)

Odsávací hlavice byla navržena jako ohnutý a následně svařený plech díky snadné a nenákladné výrobě. K takto ohnutému plechu bude následně přivařena trubka pod úhlem 45° na příslušný eliptický otvor pro připojení rozvodné hadice.

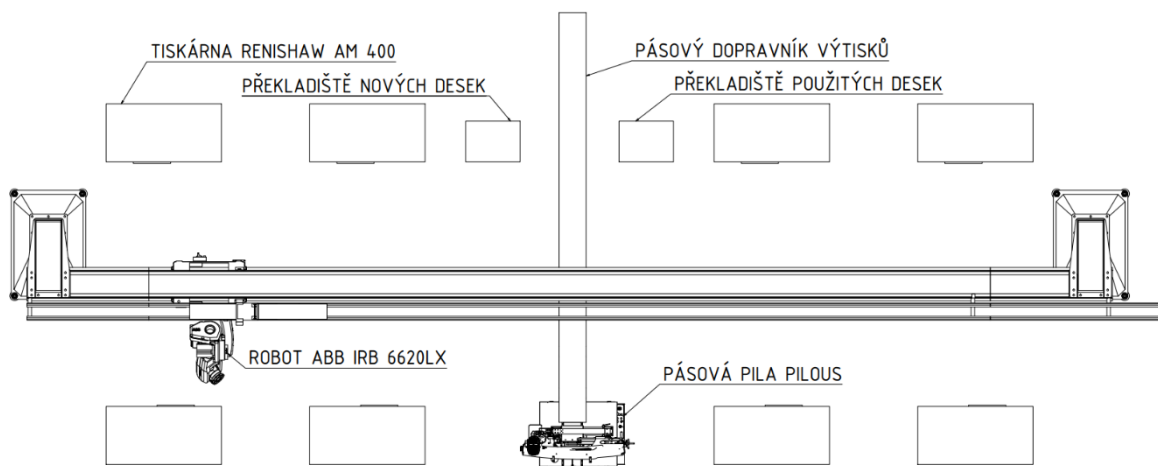
Pro maximalizaci účinku odsávání je třeba celý modul zatěsnit z ostatních stran, proto je plech hlavice veden po všech stranách a pouze v zadní straně je nutný výřez pro probíhající pilový pás (na obrázku 30).



Obr. 30: Odsávací hlavice s výřezem pro pilový pás

3.5 Koncepční návrh automatizace procesu se začleněním robotického podavače a další kroky pro zvýšení funkčnosti a stupně automatizace pily

Plně automatický proces, který využívá robotického ramene, by měl využívat určitě více než jednu tiskárnu. Nemá smysl instalovat drahé robotické rameno, aby přesouvalo výtisky pouze z jedné tiskárny, když jedna stavba trvá průměrně 8 a více hodin. Koncepční návrh počítá s osmi tiskárnami RENISHAW AM 400. Výběr robota musí splňovat několik požadavků, zejména pak přípustnou zátěž, která by měla být vyšší než 100 kg. Aby se robot mohl pohybovat mezi tiskárnami, měl by být součástí lineární osy nebo umístěn na lineární ose. Pro tento koncept byl zvolen robot ABB IRB 6620LX, jehož robotické rameno je umístěno na mostové konstrukci škálovatelného lineárního pohybu. Zvolena byla konkrétně varianta s inverzním zavěšením, aby rameno mohlo operovat na obě strany. Nosnost IRB 6620LW je 150 kg, tedy vyhovující i pro nejtěžší výtisky. Rozsah pohybu lineární osy pro myšlený proces okolo 15 000 mm, aby rameno bylo schopné obsáhnout všechny tiskárny. [17]



Obr. 31: Koncepční návrh automatického procesu

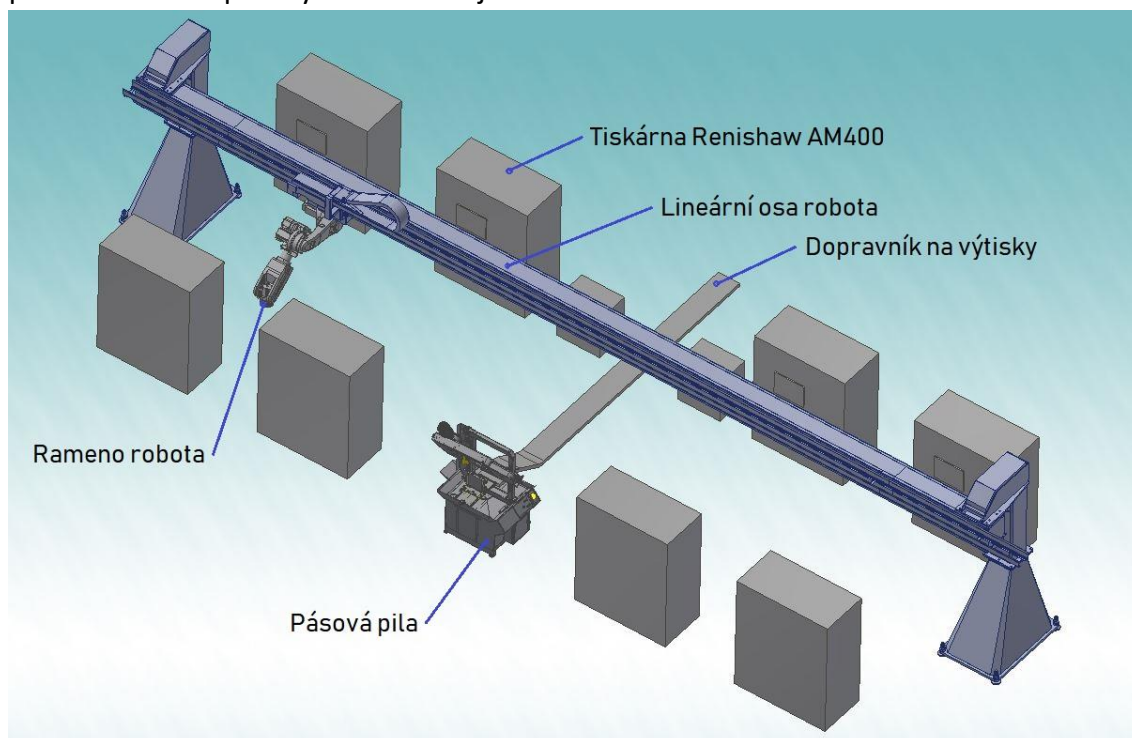
Uprostřed celé výroby, která je na obrázku 31, je umístěna pila, jež byla předmětem konstrukčních úprav. Pro tuto úroveň automatizace jsou však třeba další úpravy. Je třeba zajistit automatické zvedání upínací desky, což vyžaduje náhradu plynových vzpěr za plnohodnotné hydraulické válce. Dále je nutné zajistit měření tloušťky upínané desky, jelikož nejsou všechny stejné. To by se dalo vyřešit umístěním referenčního indukčního čidla tak, aby snímalo upnutou desku a nulový bod by se nastavil přímo na jejím povrchu.

Další konstrukční úpravy pro tuto výrobu by musely proběhnout na tiskárně samotné. Dnešní tiskárny nejsou navrhovány pro začlenění do automatického procesu tohoto druhu a stále počítají se značnou porcí lidské práce. To je zejména znatelné při samotném vyndávání výtisků z tiskárny. Nejprve musí operátor ručně co nejdůkladněji odstranit přebytečný kovový prach z tiskového prostoru. Pak může otevřít malinkatá dvířka a povolit upínací šrouby základní desky. Následuje opatrné vyndání stavby z tiskárny a stále je na výtiscích přítomno množství prachu, které pak poletuje v okolí. Úpravy tiskárny by tedy musely zahrnovat automatické odstranění zbytkového prášku

po stavbě, větší přístupový otvor a přispůsobení základních desek pro manipulaci s robotickým ramenem.

Dále jsou potřebnou součástí procesu překladiště na nové a použité desky. Nové desky jsou připravené pro tisk, zatímco použité desky se odebírají na přebroušení. Pro přepravu odříznutých výtisků není třeba robotického ramene, výtisky po odříznutí spadnou na pásový dopravník a jsou přepraveny na výstupní kontrolu a další operace. Součástí finálního návrhu takového procesu by musel nezbytně být i uchopovací mechanismus ramene uzpůsobený pro základní desky.

V celém konceptu je všude dostatek volného prostoru pro příslušenství tiskáren, dopravníků, překladišť a pily stejně tak jako dostatek místa pro pohyb obsluhy. 3D pohled na koncepční výrobu obsahuje obrázek 32.

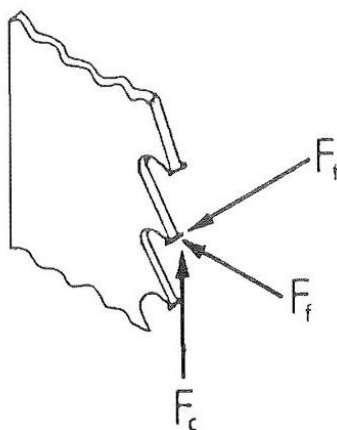


Obr. 32: 3D pohled na koncept automatického procesu

4 Výpočtová část

4.1 Stanovení rezných sil

Téměř všechny další výpočty se budou odvíjet od silových účinků při řezání. V rovnici 1 v kapitole o silovém ovlivnění výtisku byla odhadnuta maximální velikost rezné tečné síly při řezání za předpokladu, že maximální síla vzniká při maximální rezné rychlosti a jmenovitém výkonu motoru. Pro připomenutí byla velikost této síly $F_t=845$ N.



Obr. 33: Rozložení sil v řezu [18]

Na obrázku 33 je schéma rozložení jednotlivých sil v řezu. Pro přehlednost, nechť F_c , F_f a F_t jsou dále označovány jako F_t , F_p a F_b jako síly tečné, posuvové a boční. Procentuální poměr jednotlivých působících sil je funkcí mnoha proměnných a nelze spolehlivě určit. Studium několika prací [18][19][20] které se zabývají problematikou měření rezných sil, vibrací pilových pásů a účinkem sil na pilový pás bylo usouzeno, že síla F_b kolmá na bok pásu má nulovou střední hodnotu, ovšem v průběhu řezu osciluje s amplitudou přibližně 30 N. To znamená, že jediná další významná síla je síla posuvová. Její velikost nejvíce závisí na rychlosti posuvu a pohybuje se v rozmezí 25% - 50% síly tečné. Uvedené vědecké práce používaly zejména dřevo jako řezaný materiál. Dřevo se na pásových pilách řeze obecně s vyšší rychlostí posuvu než kovy, takže s klidem lze předpokládat spodní hranici tohoto rozmezí a stanovit tak velikost posuvové síly jako (3):

$$F_p = 0,25 \cdot F_t = 0,25 \cdot 845 = 211,25 \text{ N} \quad (3)$$

4.2 Kontrola upínacích systémů

Tato část bude zaměřena na výpočet upínacích sil jednotlivých možností upnutí a jejich specifické vlastnosti.

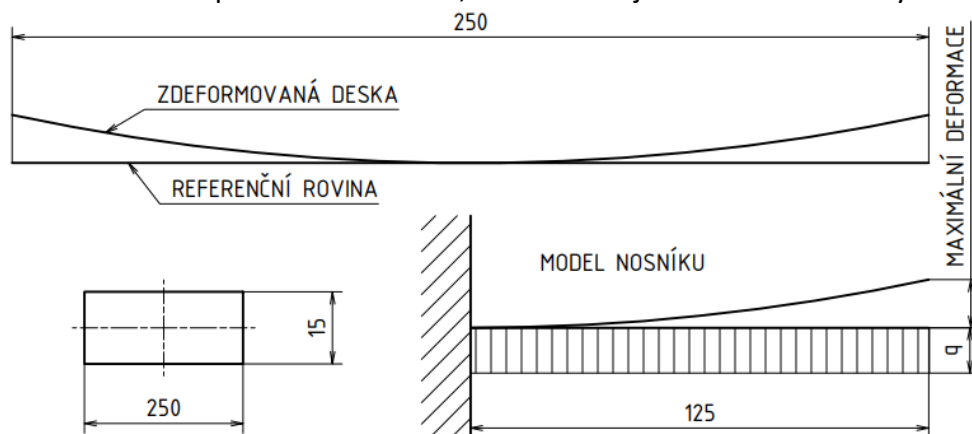
4.2.1 Magnetické upínání

Magnet Walmag Neomill Compact paleta má jmenovitou upínací sílu $F_s = 160$ N/cm². Při vybraném rozměru magnetu $w \times h = 240 \times 240$ mm to pak znamená celkovou upínací sílu dle rovnice 4:

$$F_n = w \cdot h \cdot F_s = 24 \cdot 24 \cdot 160 = 92\,160 \text{ N} \quad (4)$$

To je opravdu značná síla a nemá smysl zjišťovat, zdali síly o velikosti méně než 1% síly upínací způsobí vychýlení odřezávané desky. Co ale u takto velké síly má smysl zjišťovat, je účinek na teplem zdeformované desky. Při tisku masivních součástí s velkou kontaktní plochou s tenkou základní deskou dochází k nerovnoměrnému chladnutí výtisku a následnému vzniku pnutí, které způsobí deformaci desky. Pro odříznutí je toto nežádoucí, protože pak nelze provést řez v bezprostřední blízkosti desky.

Předpokládejme, že deformace desky nastane pouze v jedné ose a lze jí popsat modelem rovinného nosníku. Takový nosník je podepřený uprostřed, což díky symetrii a nulovému natočení uprostřed znamená, že ho lze zjednodušit na běžný vetknutý



Obr. 34: Základní deska popsaná modelem rovinného nosníku

nosník zatížený spojitým zatížením q , které lze dopočítat z upínací síly magnetu. Takový model je na obrázku 34.

Za předpokladu, že síla magnetu působí se stejnou velikostí i v mírné vzdálenosti od povrchu (do 1 mm), lze dopočítat maximální přípustnou deformaci desky v , kterou je magnet schopen svou silou narovnat. Výpočet je proveden pomocí Mohrova integrálu pro ocel ($E = 210\,000$ MPa), desku o tloušťce 15 mm a šířce 250 mm.

$$q = \frac{w \cdot F_s}{10} = \frac{24 \cdot 160}{10} = 384 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (5)$$

$$M(x) = q \cdot \frac{x^2}{2} = 384 \cdot \frac{x^2}{2}; m(x) = 1 \cdot x \quad (6)$$

$$v = \int_0^l \frac{M(x) \cdot m(x)}{E \cdot J} dx = \int_0^{125} \frac{384 \cdot \frac{x^2}{2} \cdot x}{210\,000 \cdot \frac{250 \cdot 15^3}{12}} dx = 0,794 \text{ mm} \quad (7)$$

V rovnici 5 je nejprve vypočítáno spojitě zatížení q z šířky desky w v centimetrech, jmenovité upínací síly magnetu F_s v N/cm^2 a převedeno na jednotku N/mm . V rovnici 6 je určení průběhu ohybového momentu podél nosníku $M(x)$ a průběh jednotkového momentu $m(x)$. V rovnici 7 je pak finální Mohrovův integrál, kde v je průhyb, l je délka nosníku a J je kvadratický moment průřezu.

Z rovnic 5, 6 a 7 vyplývá, že magnet je schopný svou silou narovnat až 0,79 mm deformace. Ve skutečnosti to bude spíše méně, protože byl u výpočtu předpoklad

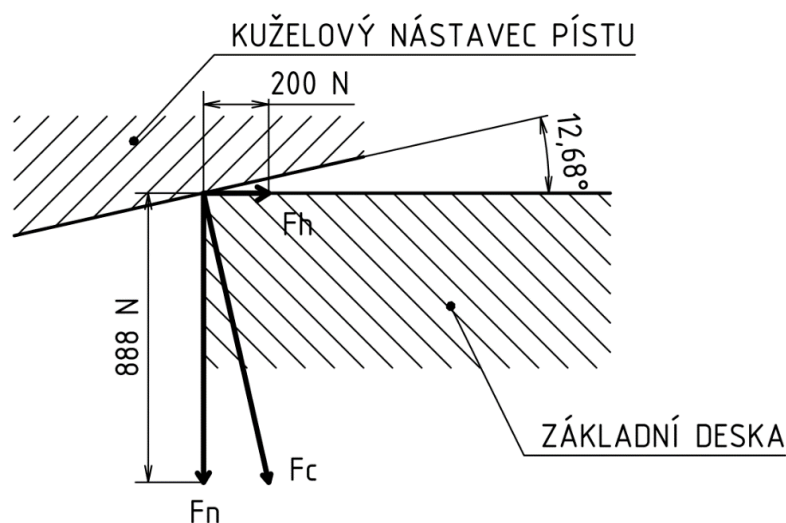
působení spojitého zatížení přes celou základní desku, i když je magnet o 10 mm kratší a také kvůli předchozímu předpokladu stejné upínací síly i přes vzduchovou mezeru.

4.2.2 Hydraulické upínání

Hydraulický agregát přítomný v pásové pile pracuje s tlakem 40 bar. Ze jmenovité upínací síly F_j hydraulického válce Römheld B1.4301-6x8 0,5 kN při tlaku 100 bar, která je lineárně závislá na tlaku, lze vypočítat horizontální sílu, kterou píst působí na základní desku podle rovnice 8:

$$F_h = \frac{F_j}{100} \cdot p = \frac{500}{100} \cdot 40 = 200 \text{ N} \quad (8)$$

Kuželový nástavec pístu se pak při interakci s válcovou dírou ve stěně desky chová jako obecná vazba a vzniká normálová reakce na kuželovou plochu, která opět může pomoci s narovnáním zdeformované desky. Rozložení sil obecné vazby je na obrázku 35.



Obr. 35: Reakční síla mezi deskou a pístem rozložená do složek

Velikost normálové složky reakční síly lze díky úhlu kužele určit přes tangentu úhlu dle rovnice 9, kde F_n je normálová síla působící na desku a F_h je horizontální síla působící na desku.

$$F_n = \frac{F_h}{\text{tg } 12,68^\circ} = \frac{200}{0,225} = 888 \text{ N} \quad (9)$$

Velikost normálové síly je v porovnání s magnetem malá, nemá smysl tak řešit rovnání zdeformované desky. Je ale nasnadě zkontrolovat upínací síly v kontextu řezných sil. Jediný směr, ve kterém se může deska za působení řezných sil vychýlit je ve směru tečné řezné síly, resp. v ose hydraulického válce. Ve všech ostatních směrech je deska mechanicky zajištěná a nemá možnost vychýlení.

Protože se navzájem osové upínací síly vyruší, může vychýlení zabránit pouze statické tření mezi deskou a magnetem. Koeficient statického tření mezi ocelí (magnet) a ostatními upínanými kovy se pohybuje nad hodnotou $\mu_0 = 0,6$ [22], což budu počítat jako nejhorší možný případ. Z každého ze čtyř hydraulických válců bude vznikat kolmá reakce $F_n = 888 \text{ N}$ na magnet. Maximální přípustná tečná řezná síla F_{tmax} se tedy dá vyjádřit podle rovnice 10.

$$F_{tmax} = 4 \cdot \mu_0 \cdot F_n = 4 \cdot 0,6 \cdot 888 = 2\,131,2 \text{ N} \quad (10)$$

V porovnání s vypočítanou řeznou silou $F_t = 845 \text{ N}$ vychází u hydraulického upínání bezpečnost proti vychýlení přibližně 2,5. S takovou bezpečností ale nelze zaručit odolání systému při vzniku rázů. Je doporučeno připojení externího hydraulického agregátu či posílení vnitřního agregátu pily na větší provozní tlak. Větší upínací síly by pak zajišťovali větší bezpečnost i vůči rázům, ale zároveň by narostl kontaktní tlak v místě dotyku a mohlo by dojít k otláčení.

4.2.3 Upínání excentrickými šrouby

Hlavní nevýhoda tohoto systému je absence vzniku normálové síly. Mechanická aretace vzniká pouze ve směru řezné síly F_t , ve všech ostatních směrech je deska zajištěna statickým třením, které vyvolává upínací síla $F_h = 9 \text{ kN}$ z každého šroubu a bloku. Objímka excentrického šroubu je z mosazi, přičemž koeficient statického tření mezi mosazí a ocelí je přibližně $\mu_0 = 0,35$ [22]. Z přímé silové rovnováhy při působení posuvové síly lze její maximální hodnotu stanovit podle rovnice 11.

$$F_{pmax} = 4 \cdot \mu_0 \cdot F_h = 4 \cdot 0,4 \cdot 9000 = 14\,400 \text{ N} \quad (11)$$

To s přehledem převyšuje skutečnou vznikající posuvovou sílu. Další způsob vychýlení je „vyrvání“ tečnou silou, která při řezu v určité vzdálenosti od desky způsobí moment příslušné velikosti. Deska se pak opře o jednu svou hranu, která se bude chovat jako osa a statické tření v upnutí musí vyrovnat silový účinek vznikajícího momentu. Maximální hodnoty řezných sil se dají určit následovně z momentové rovnováhy k vzniklé ose opření dle rovnic 12 a 13, kde F_{tmax} a F_{pmax} jsou maximální přípustné příslušné síly, l_d je délka desky, h_{max} je maximální řezná výška a u_1 a u_2 jsou vzdálenosti upínek od osy momentové rovnováhy.

$$F_{tmax} = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot F_h \cdot l_d}{h_{max}} = \frac{2 \cdot 0,35 \cdot 9000 \cdot 250}{200} = 7875 \text{ N} \quad (12)$$

$$F_{pmax} = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot F_h \cdot (u_1 + u_2)}{h_{max}} = \frac{2 \cdot 0,35 \cdot 9000 \cdot (60 + 190)}{200} = 7875 \text{ N} \quad (13)$$

Velikost těchto sil je přibližně 9x větší než skutečné vznikající síly, proto tento způsob upínání vyhovuje, i když má nevýhodu absence normálové síly.

4.3 Kontrola sklápěcího mechanismu, lineárního vedení a pohybového šroubu

4.3.1 Kontrola sklápěcího mechanismu

Plynové vzpěry budou nastaveny na maximální tlačnou sílu $F_v = 420 \text{ N}$. Ve vertikální poloze mechanismu zajišťují svým silovým účinkem aretaci mechanismu, úhel vzpěr k horizontální rovině α je vypočten v rovnici 14 z promítnutých délek vysunutých vzpěr Δx a Δy . Vychýlení pilovým pásem může nastat pouze působením síly boční na pilový pás. V nejhorším případě, kdy je řez prováděn v bezprostřední blízkosti základní desky,

nevzniká účinek posuvové síly, která svým působením vytváří stabilizační moment. Potom se maximální přípustná boční síla F_{bmax} opět vypočte z momentové rovnováhy k ose sklápění podle rovnice 15.

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x} = \arctg \frac{35}{155} = 12,724^\circ \quad (14)$$

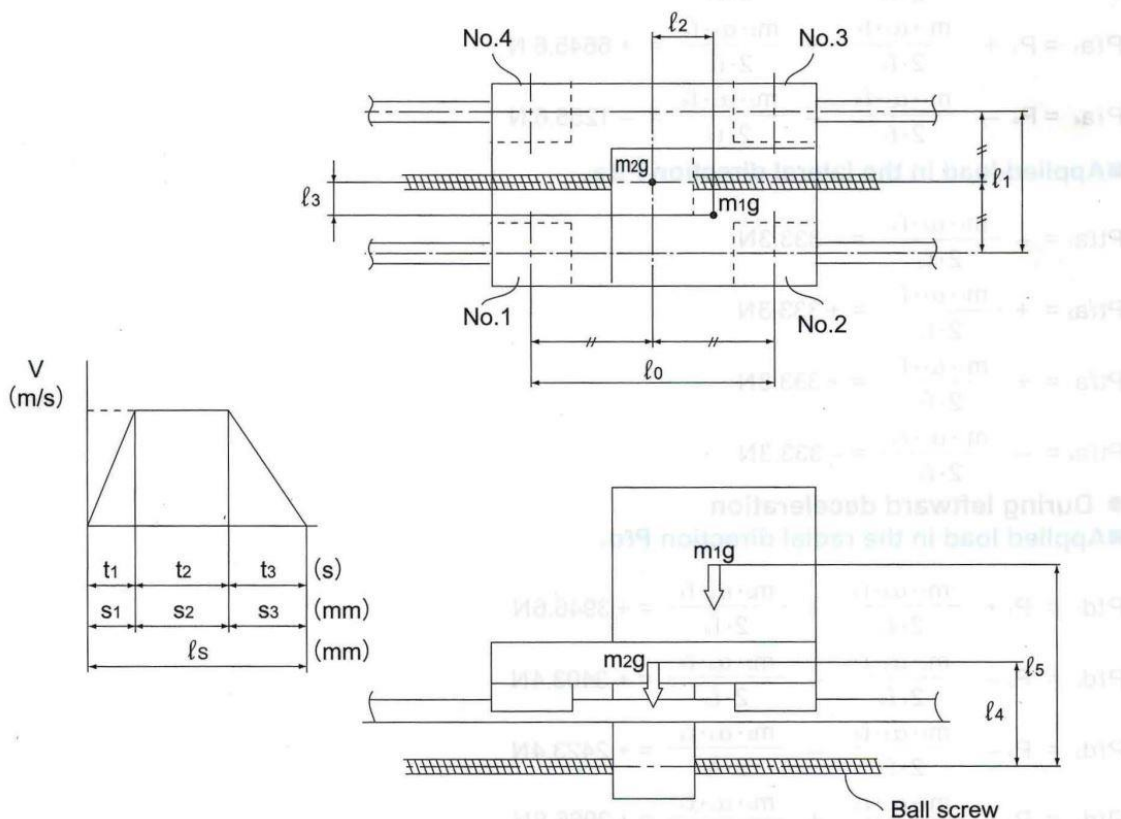
$$F_{bmax} = \frac{2 \cdot F_v \cdot \cos \alpha \cdot \Delta y}{\Delta y_2} = \frac{2 \cdot 420 \cdot \cos 12,724^\circ \cdot 35}{260} = 110,3 \text{ N} \quad (15)$$

Lze s jistotou říci, že vypočtená maximální boční síla při řezu nemůže nastat, tedy není třeba další mechanické aretace a nedojde k vychýlení. Obdobné velikosti bude počáteční síla vyvinutá obsluhou při pokládání do horizontální roviny.

4.3.2 Kontrola lineárního vedení

Základní dynamické zatížení bloků MISUMI SELBLV 20mm je $C = 7,2 \text{ kN}$, statické pak $C_0 = 13,5 \text{ kN}$ [21]. Maximální provozní hmotnost sestavy montované na lineární vedení je 100 kg (dle modelu 37 kg vlastní sestava, maximálně 63 kg obrobek), což odpovídá zátěži 981 N. Statická kontrola tedy s přehledem vyhovuje.

Pro výpočet životnosti bloků byl použit výpočet dle katalogu THK [21] se stanovením ekvivalentní dynamické zátěže pro zrychlující hmotnost. Stanovení ekvivalentní dynamické zátěže pro takovou situaci je zobrazeno na obrázku 36.



Obr. 36: Schéma výpočtu ekvivalentního dynamického zatížení jednotlivých bloků [23]

Proveden byl výpočet nejvíce zatíženého bloku lineárního vedení pomocí tabulkového kalkulátoru a rovnic dle [23], vzhledem k jeho rozsahu nebude uveden

v této práci. Při výpočtu byly některé rozměry odměřeny z modelu a jiné musely být odhadnuty, zejména poloha těžišť. Použité rozměry jsou $l_0 = 170$ mm, $l_1 = 280$ mm, $l_2 = 100$ mm, $l_3 = 0$ mm pro symetrický obrobek, $l_4 = 20$ mm, $l_5 = 170$ mm. Hodnota zrychlení byla zvolena stejná pro případ zrychlení i zpomalení, a to sice $a = 2$ m/s². Hmotnosti byly do schématu rozděleny tak, aby odpovídali co nejvíce skutečnosti. Do hmotnosti obrobku byl započítán i magnet s rámem, jelikož svou polohou odpovídají dle schématu právě obrobku. Hmotnosti byly tedy rozděleny na $m_1 = 93$ kg a $m_2 = 7$ kg. Pro stanovení průměrné zátěže bloků byl použit zdvih $l_s = 0,4$ m, $s_1 = 0,000625$ m, $s_2 = 0,39875$ m, $s_3 = 0,000625$ m, $t_1 = 0,025$ s, $t_2 = 7,975$ s, $t_3 = 0,025$ s. Dle výpočtu vyšly nejvíce zatížené bloky 2 a 3, jejichž průměrné ekvivalentní dynamické zatížení vyšlo $F_e = 432,62$ N.

Ekvivalentní dynamické zatížení lze pak přímo použít k výpočtu trvanlivosti lineárního vedení dle rovnice 17, kde C je dynamická trvanlivost vozíku.

$$L = \left(\frac{C}{F_e}\right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{7\,200}{432,62}\right)^3 \cdot 50 = 230\,488 \text{ km} \quad (17)$$

Za takovou trvanlivost by se nestydělo kdejaké auto, a pojezd na pile určitě takovým nájezdem trpět nebude. Pro zajištění této životnosti je ale třeba lineární vedení důkladně mazat a co nejvíce zamezit vniknutí třísek a jemného kovového prachu.

4.3.3 Kontrola pohybového šroubu

Nejprve je třeba stanovit provozní sílu působící na šroub. Ta se skládá z dílčích tření v blocích lineárního vedení $f = 3$ N, setrvačných sil sestavy při zrychlení a kluzného odporu vedení (18).

$$F_o = \mu \cdot m \cdot g + 4 \cdot f + m \cdot a = 0,005 \cdot 100 \cdot 9,81 + 4 \cdot 3 + 100 \cdot 2 = 217 \text{ N} \quad (18)$$

Byl zvolen šroub Tr 10x2 ČSN 01 4050 v délce $L = 450$ mm. Funkční rozměry tohoto závitů jsou: $d = 10$ mm, $d_2 = 9$ mm, $d_3 = 7,5$ mm, $H_1 = 1$ mm, $P = 2$ mm. Výška zvolené matice je $h_m = 24$ mm. Parametry tohoto závitů jsou vypočítány v rovnicích 19, 20 a 21.

$$\gamma = \arctg\left(\frac{i \cdot P}{\pi \cdot d_2}\right) = \arctg\left(\frac{1 \cdot 2}{\pi \cdot 9}\right) = 4,046^\circ \quad (19)$$

$$\beta_n = \arctg(\tg(\beta) \cdot \cos(\gamma)) = \arctg(\tg(15) \cdot \cos(4,046)) = 14,964^\circ \quad (20)$$

$$\varphi' = \arctg\left(\frac{\mu}{\cos(\beta_n)}\right) = \arctg\left(\frac{0,21}{\cos(14,964)}\right) = 12,264^\circ \quad (21)$$

Jako důležitá kontrola je uvedena kontrola otláčení závitů, kde by neměl kontaktní tlak p_k přesáhnout 8 MPa pro šroub-matku z materiálů ocel-mosaz (22)(23). Nejprve je vypočten počet činných závitů v matici z_ζ , který je použit k výpočtu kontaktního tlaku p .

$$z = \frac{h_m}{P} = \frac{24}{2} = 12 \rightarrow z_\zeta = 10 \quad (22)$$

$$p_k = \frac{F_o}{z_\zeta \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H_1} = \frac{217}{10 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 1} = 0,767 \text{ MPa} \leq 8 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (23)$$

Pro další kontrolní výpočty je třeba spočítat kroutící moment $M_{kš}$ potřebný pro výkon pohybu a zkontrolovat, zdali nepřekračuje kroutící moment motoru.

$$M_{kš} = F_o \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') = 217 \cdot \frac{9}{2} \cdot \operatorname{tg}(4,046^\circ + 12,264^\circ) = 286 \text{ Nmm} \quad (24)$$

Jmenovitý kroutící moment motoru je 320 Nmm, tedy vyhovující. Dále pro statickou pevnostní kontrolu je nejprve vypočteno napětí v tlaku σ_d (25), napětí v krutu τ_k (26) a redukované napětí σ_{red} dle hypotézy τ_{max} (27), které by mělo být menší než mez únavy materiálu šroubu. Ten je z oceli 1.1190 a její mez únavy je přibližně 0,3 násobek mezi kluzu σ_k , která je 490 MPa. Výsledná statická bezpečnost je pak v rovnici 28.

$$\sigma_d = \frac{4 \cdot F_o}{\pi \cdot d_3^2} = \frac{4 \cdot 217}{\pi \cdot 7,5^2} = 4,9 \text{ MPa} \quad (25)$$

$$\tau_k = \frac{16 \cdot M_{kš}}{\pi \cdot d_3^3} = \frac{16 \cdot 286}{\pi \cdot 7,5^3} = 3,5 \text{ MPa} \quad (26)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_d^2 + 4 \cdot \tau_k^2} = \sqrt{4,9^2 + 4 \cdot 3,5^2} = 8,5 \text{ MPa} \quad (27)$$

$$k = \frac{0,3 \cdot \sigma_k}{\sigma_{red}} = \frac{0,3 \cdot 490}{8,5} = 17,3 \quad (28)$$

Statická bezpečnost 17,3 je více než dostačující. Dále bude proveden výpočet kritické síly na vzpěr dle Eulera, kvůli značně veliké štíhlosti. Pro tuto konstrukci je uvažován případ vzpěru 2 a síla kritická je vypočtená v rovnici 29. Osová síla vznikající v mechanismu by neměla překročit sílu kritickou, a to s bezpečností minimálně 3,5 (30).

$$F_{krit} = 1 \cdot \frac{\pi^3 \cdot E \cdot d_3^4}{64 \cdot l_s^2} = 1 \cdot \frac{\pi^3 \cdot 210\,000 \cdot 7,5^4}{64 \cdot 450^2} = 1\,590 \text{ N} \quad (29)$$

$$k_v = \frac{F_{krit}}{F_o} = \frac{1\,590}{217} = 7,3 \geq 3,5 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (30)$$

Z těchto kontrolních výpočtů vyplývá, že pohybový šroub je v této konstrukci spíše předimenzovaný, protože jeho velikost byla zvolena proporcionálně. To ale ničemu nevádí a naopak to zaručuje v kombinaci s předimenzovaným lineárním vedením dlouhodobou spolehlivost mechanismu.

5 Závěr

Z rešerše existujících řešení pro oddělování 3D výtisků ze základních desek jednoznačně vyplývá, že nejekonomičtější variantou je pásová pila. Model ARG 300 3D je pak nejdostupnější z aktuálně vyráběných specializovaných pil, ale není nejpokročilejší. Navržené modifikace zvyšují funkčnost pily a posouvají jí na úroveň mnohem dražších pil při zachování nízké ceny. To je samozřejmě pozitivní výsledek a pro pilu to znamená větší konkurenceschopnost a s ní spjaté vyšší prodeje i do zahraničí.

Byla navržena lineární osa pro polohování odřezávané desky. Její přesnost dovoluje jemné nastavování výšky řezu a její zdvih umožňuje řezání velmi silných desek, či dokonce řezání v několika úrovních. Bylo použito lineární vedení MISUMI SSELBLV o velikosti 20 mm s příslušnými vozíky. Pohybový šroub má trapézový profil o průměru 10 mm a je poháněn motorem Ezi-Servo ST 42S o kroutícím momentu 32 Ncm. Užitečný rozsah lineární osy za pilovým pásem je 200 mm a celkový rozsah pak činí přes 400 mm pro pohodlné ustavování desek.

Na lineární osu byl umístěn mechanismus sklápění desky do horizontální roviny, který využívá plynové vzpěry Essentra Components. Díky tlačné síle vzpěr není třeba další mechanická aretace ve vertikální poloze, což bylo dokázáno výpočtem.

Sklápnutá rovina byla osazena četnými možnostmi upnutí desky. Nyní lze desku upnout čtyřmi způsoby, což je nevídané. Jedná se o permanentní magnet, excentrické upínací šrouby, hydraulické upínání a čtyři šrouby v rozích desky. Každý z navržených upínacích systémů má svoje specifické použití, dokonce lze použít i tři z nich naráz.

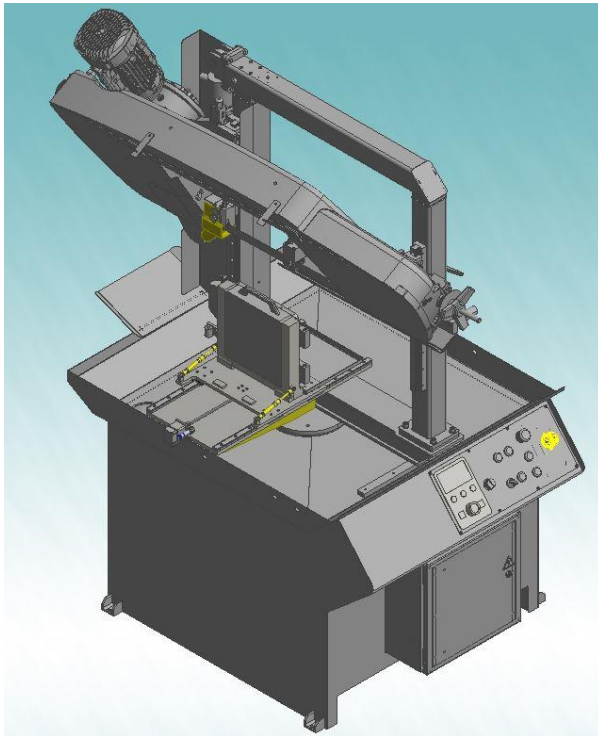
Byla navržena hlavice odsávání s přípravou pro připojení externího vysavače. Její jednoduchá konstrukce má nízké výrobní náklady a dá se rychle odmontovat v případě výměny pilového pásu.

Proběhl návrh automatického procesu s využitím této pily, několika 3D tiskáren Renishaw AM400 a robotického ramene s lineární osou. V závislosti na průměrné délce výtisku lze s jednou pilou obsloužit až 8 tiskáren.

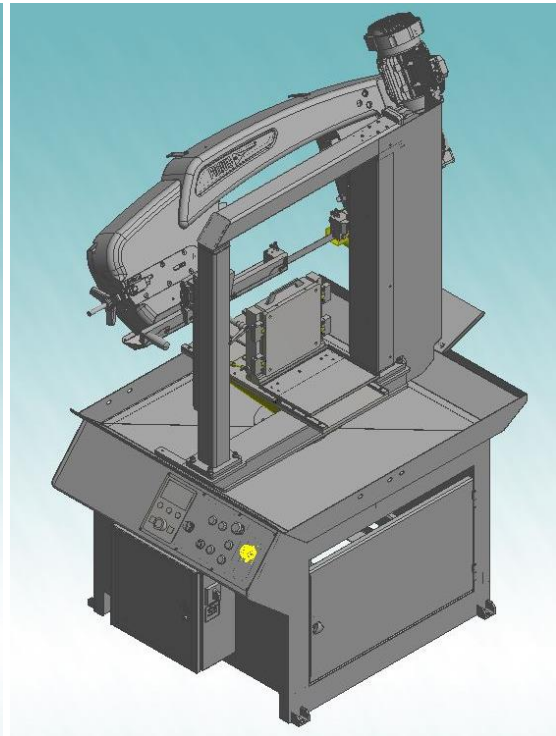
Kontrolní výpočty konstrukčních řešení vyhovují a životnost cyklicky namáhaných součástí vysoce přesahuje požadavky. Model a výkresy byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor 2017, který bych tímto chtěl vřele doporučit i ostatním studentům.

V průběhu tvorby této práce vydala firma Pilous novou, vylepšenou verzi pily a změnila její název na Xpert 3.0 3D. Změny se nesly ve podobném duchu jako cíle této práce, tedy nová možnost upnutí desek, zvýšení rozsahu nastavení výšky řezu a sklápění desky do horizontální roviny.

Na obrázcích 37 a 38 je 3D pohled na finální sestavu pily po konstrukčních úpravách.



Obr. 37: Finální sestava pily



Obr. 38: Finální sestava pily

Použitá literatura a zdroje

- [1] [online]. [cit. 2018-12-27]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/audi-gives-update-use-slm-metal-3d-printing-automotive-industry-129376/>
- [2] CHAPMAN, Woodrow W. *Modern machine shop's handbook for the metalworking industries*. Cincinnati, Ohio: Hanser Gardner Publications, 2002. ISBN 1-56990-345-x.
- [3] Pilous - pásové pily - Pilové pásy. *Pilous - pásové pily - Pilové pásy* [online]. Brno: JRWN, 2016 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://www.pilous.cz/metal/pilove-pasy>
- [4] KURZYNOWSKI, Tomasz, Eckhard BEYER, Timothy MORRIS, Edward CHLEBUS, Bogumiła KUŹNICKA a Jacek REINER. *Parameters in selective laser melting for processing metallic powders* [online]. In: . 2012-2-9, s. 823914- [cit. 2019-01-30]. DOI: 10.1117/12.907292. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.907292>
- [5] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. v Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [6] OKI OS-UZ wire [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://www.okidensen.co.jp/en/prod/discharge_wire/wire/os-uz-en.pdf
- [7] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [8] *How accurate is wire EDM?* [online]. October 4, 2017 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://www.micropulsewest.com/our-blog/how-accurate-is-wire-edm/>
- [9] *Wire EDM solutions LLC* [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <http://wireedmsolutions.com/>
- [10] *SODICK VL400Q* [online]. In: . [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <https://stroje.zenit.cz/produkt/sodick-vl400q>
- [11] *FANUC ROBOCUT α-C600iA* [online]. In: . [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <http://www.penta-edm.cz/fanuc-robocut-a-c600ib-dratova-rezacka/>
- [12] *Klaeger bitron300 3D* [online]. In: . [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <http://www.3dcut.eu/maschinen>
- [13] *KASTOwin amc* [online]. In: . [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <https://www.kasto.com/en/products/sawing-machines/sawing-machines-detail-page/kastowin-amc.html>
- [14] *ARG 300 3D* [online]. In: . [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <https://www.pilous.cz/metal/pasove-pily-pro-3d-tisk/arg-300-3d#specification>
- [15] *Neomill Compact paleta* [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://eshop.walmag.cz/Manufacturer/cs-CZ/79/magneticky-upinac-neomill-compact-paleta>
- [16] *Eccentric Clamping Clamps* [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z:



- <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/221005520041/>
- [17] *IRB 6620LX* [online]. [cit. 2019-03-30]. Dostupné z:
<https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6620lx>
- [18] LENGOC, Lan. *Vibration of bandsaws*. Canterbury, 1990. Disertace. University of Canterbury.
- [19] LEHMANN, Bruce Friedrik. *The cutting behavior of bandsaws*. Vancouver, 1993. Disertace. The University of British Columbia.
- [20] MORADPOUR, Payam, Frieder SCHOLZ, Kazem DOOSTHOSEINI a Asghar TARMIAN. Measurement of Wood Cutting Forces during Bandsawing Using Piezoelectric Dynamometer. *Drvna industrija* [online]. 2016, 67(1), 79-84 [cit. 2019-03-30]. DOI: 10.5552/drind.2016.1433. ISSN 00126772. Dostupné z:
<https://hrcak.srce.hr/154666>
- [21] *Mechanické součásti pro automatizaci montáže*. Schwalbach: MISUMI Europa GmbH, 2011.
- [22] SOUČINTEL TŘENÍ. *E-konstruktor* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z:
<https://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
- [23] Calculating the applied load. *THK* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z:
https://tech.thk.com/en/products/pdf/en_b01_056.pdf
- [24] KOPECKÝ, Miloslav a HOUŠA, Jaromír. 2. vyd. *Základy stavby výrobních strojů*. Praha: ČVUT, 1989. ISBN 80-01-00993-9
- [25] HOUŠA, Jaromír a RUDOLF, Bedřich. *Výrobní stroje*. 3 přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00085-0
- [26] *EZI-SERVO ST – KROKOVÉ MOTORY SE ZPĚTNOU VAZBOU A EXTERNÍM DRIVEREM* [online]. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z:
<https://www.raveo.cz/krokove-motory-zpetna-vazba-driver-fastech>

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma procesu DMLS tisku. [přeloženo][4]	13
Obr. 2: Výtisky přivařené k základní desce [1]	14
Obr. 3: Běžná dílenská pila s hydraulickým válcem Bomar STG 220	15
Obr. 4: Konstrukce bimetalového pásu [3]	16
Obr. 5: Schéma elektroerozivního drátování [7]	17
Obr. 6: Průřez povlakovaného řezacího drátu [6]	19
Obr. 7: Povrch po odříznutí výtisku na pile	20
Obr. 8: Povrch po oddělení na drátovačce	21
Obr. 9: Výtisk s viditelným poškozením od pilového pásu	22
Obr. 10: Ukázková součást 5D obrábění na drátovačce [9]	24
Obr. 11: SODICK VL400Q [10]	28
Obr. 12: FANUC ROBOCUT α -C600iA [11]	29
Obr. 13: KLAEGER bitron300 3D [12]	30
Obr. 14: KASTO KASTOwin amc [13]	31
Obr. 15: Pilous ARG 300 3D [14]	32
Obr. 16: Magnetický upínač Walmag Neomill Compact paleta. [15]	34
Obr. 17: 3D vizualizace konstrukce upínání s využitím magnetu	35
Obr. 18: Schéma hydraulického upínání	35
Obr. 19: 3D reprezentace konstrukce hydraulického upínání	36
Obr. 20: Tvar a rozměry excentrického upínacího šroubu Halder 23270.0112 [16]	37
Obr. 21: Čelní pohled na systém excentrického upínání	37
Obr. 22: 3D pohled na excentrické upínací šrouby	38
Obr. 23: Kinematické schéma zvedání rámu	38
Obr. 24: Vizualizace sklápění	39
Obr. 25: 3D pohled na mechanismus zvedání pomocí plynových vzpěr	40
Obr. 26: Pohybová soustava	40
Obr. 27: Schéma zapojení ovládání motoru [26]	41
Obr. 28: Umístění pohybové soustavy v rámci pily	42
Obr. 29: Odsávací hlavice a knoflíkové šrouby	43
Obr. 30: Odsávací hlavice s výřezem pro pilový pás	44
Obr. 31: Konceptní návrh automatického procesu	45
Obr. 32: 3D pohled na koncept automatického procesu	46
Obr. 33: Rozložení sil v řezu [18]	47
Obr. 34: Základní deska popsána modelem rovinného nosníku	48
Obr. 35: Reakční síla mezi deskou a pístem rozložená do složek	49
Obr. 36: Schéma výpočtu ekvivalentního dynamického zatížení jednotlivých bloků [23]	51
Obr. 37: Finální sestava pily	55
Obr. 38: Finální sestava pily	55



Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání přesnosti drátořezu a pásové pily	21
Tabulka 2: Vlastnosti stroje SODICK VL400Q [10]	28
Tabulka 3: Vlastnosti stroje FANUC ROBOCUT α -C600iA [11]	29
Tabulka 4: Celkové porovnání technologií drátořezu a pásové pily	33

Seznam příloh

Výkresová dokumentace

BP_001	Sestava lineární osy pohybu a upínacích systémů
BP_002	PILOUS ARG 300 3D_MOD1

Elektronické přílohy

BP_sestava.step	Model podsestavy osy a upínacích systémů ve formátu .STEP
BP_001.pdf	Soubor výkresu BP_001
BP_002.pdf	Soubor výkresu BP_002