



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH TECHNOLOGIE PRO ŘEZÁNÍ A GRAVÍROVÁNÍ ROTAČNÍCH POLOTOVARŮ NA CO₂ LASERU

DESIGN OF TECHNOLOGY FOR CUTTING AND ENGRAVING OF ROTARY SEMI-FINISHED PRODUCTS FOR THE CO₂ LASER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Šrenk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Slaný, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Vojtěch Šrenk
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Martin Slaný, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Návrh technologie pro řezání a gravírování rotačních polotovarů na CO2 Laseru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma práce se zaměřuje na problematiku řezání a gravírování rotačních polotovarů na CO2 laserech. Práce bude rozdělena do několika hlavních částí. První část bude zaměřena na hodnocení dostupných řešení, které trh nabízí a formou rešerše budou zhodnoceny přínosy a nedostatky jednotlivých variant. Na základě této rešerše bude v další části navržen inovovaný design rotační osy, od které se očekává možnost ustavení libovolného rotačního tvaru, který bude možno následně řezat nebo gravírovat dle předlohy. Rotační osa musí být koncipována tak, aby eliminovala tvarové a proporční deformace, které by vznikali na obecné ploše rotačního polotovaru v případě použití lineární osy. V práci budou vytipovány reprezentativní polotovary, které budou sloužit pro následné ověření správnosti řešení. Další část práce bude zaměřena na návrh a přípravu výroby a samotnou výrobu. V závěrech budou zhodnoceny dosažené výsledky z realizovaných experimentů.

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše současných dostupných řešení a zhodnocení jejich výhod a nevýhod.
- Konstrukční návrh technologie pro substituci za lineární osu.
- Návrh a příprava výroby komponent pro sestavení rotační osy.
- Testování prototypu rotační osy příprava testovacích vzorků a následné hodnocení.
- Závěry plynoucí z realizace problematiky.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří a Petr BLECHA. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN isbn978-80-254-7980-3.

BORSKÝ, Václav. Obráběcí stroje. Brno: VUT, 1992. ISBN isbn80-214-0470-1.

BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. 2. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1991.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUT IUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN isbn978-80-214-2629-0.

Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91- 97 22 99-4-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh a implementaci rotační osy do CO₂ laserové řezačky pro možnost řezat a gravírovat rotační obrobky. Práce se zabývá vytipováním několika podobných dostupných známých konkurenčních řešení, u kterých jsou zhodnoceny klady a zápory. Na základě získaných poznatků jsou zvoleny vhodné parametry pro dosažení maximální univerzálnosti navrhovaného systému. Univerzálnost je v tomto ohledu vztažena k možnosti řezat a gravírovat co nejširší škálu rotačních obrobků. Práce dále popisuje konstrukční řešení, postup sestavení osy, návrh výroby a výrobu jednotlivých komponent pomocí technologie 3D tisku (FFF), vytipování vhodných normalizovaných komponent a samotnou realizaci. Závěry práce se pak zaměřují na navrženého řešení z ekonomického a technického hlediska.

Klíčová slova

nekonvenční metody obrábění, CO₂ laser, gravírování, rotační osa

ABSTRACT

The thesis deals with the design and implementation of a rotary axis in a CO₂ laser cutter for the ability to cut and engrave rotary workpieces. The thesis is focused on identifying several similar available known competitive solutions, for which the pros and cons were evaluated. Based on the findings, suitable parameters were selected to achieve maximum versatility of the proposed system. Versatility in this respect is related to the ability to cut and engrave the widest possible range of rotary workpieces. The thesis also describes the design solution, axis assembly procedure, production design and production of individual components using 3D printing technology (FFF), selection of suitable standardized components and the actual implementation. The conclusions then focus on the proposed solution from an economic and technical point of view.

Key words

unconventional machining methods, CO₂ laser, engraving, rotary axis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠRENK, Vojtěch. *Návrh technologie pro řezání a gravírování rotačních polotovarů na CO2 Laseru* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140255>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Martin Slaný.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Návrh technologie pro řezání a gravírování rotačních polotovarů na CO2 laseru vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Vojtěch Šrenk

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Martinovi Slanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce, jeho ochotu a věnovaný čas. Velké díky také patří mé rodině, blízkým a přátelům za podporu během celého bakalářského studia.

OBSAH

ÚVOD	10
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	11
1.1 Vývoj nekonvenčních metod obrábění	11
2 LASEROVÉ METODY OBRÁBĚNÍ – LBM	13
2.1 Fyzikální princip laseru	13
2.1.1 Vznik laserového paprsku	13
2.1.2 Absorpce, spontánní a stimulovaná emise záření	14
2.2 Druhy laserů	14
3 CO ₂ LASER.....	15
3.1 Parametry ovlivňující proces řezání	15
3.1.1 Výkon a intenzita laseru	15
3.1.2 Ohnisková vzdálenost.....	15
3.1.3 Posuvová rychlost.....	16
3.1.4 Procesní plyn a tlak plynu	17
3.1.5 Průměr trysky a odstupová vzdálenost	17
3.1.6 Materiál obrobku	18
3.2 Typy CO ₂ laserů	18
3.3 Gravírování pomocí CO ₂ laseru	19
3.4 Charakteristika gravírovacího laseru dle druhu materiálu.....	21
4 PRŮZKUM TRHU.....	23
4.1 Rotační osa pro laserové plotry CO ₂	23
4.2 Rotační osa na válečkové plošině.....	23
4.3 Rotační osa s koly.....	24
4.4 Porovnání všech os	25
5 NÁVRH A REALIZACE INOVATIVNÍ ROTAČNÍ OSY	27
5.1 Návrh konstrukce osy	27
5.2 Popis konstrukčních celků.....	28
5.2.1 Rám rotační osy	28
5.2.2 Lineární vedení	29
5.2.3 Posuvný pohyb příruby v ose Z.....	31
5.2.4 Pohyblivá příruba	32
5.2.5 Pevná příruba.....	33
5.3 Postup výroby navržených dílů pomocí FFF technologie.....	34
5.4 Připojení rotační osy k CO ₂ laserové řezačce.....	36
5.5 Softwary pro vytváření grafiky a gravírovacího programu.....	37
5.6 Nastavení rotační osy v RDWorks	38
5.6.1 První metoda výpočtu počtu kroků pro otočení obrobku o 360 °.....	38
5.6.2 Druhá metoda výpočtu počtu kroků pro otočení obrobku o 360 °	39
5.6.3 Porovnání obou metod.....	39
5.7 Experimentální ověření navržených postupů rotační osy na CO ₂ laserové řezačce....	39
5.7.1 Varianta 1 - Obrobek s konstantním vnějším průměrem.....	40
5.7.2 Varianta 2 - Obrobek s proměnlivým vnějším průměrem	40

6	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	42
6.1	Náklady na potřebné díly pro rotační osu	42
6.2	Náklady na konstruktéra.....	42
6.3	Návratnost investice	43
	ZÁVĚR.....	44
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	48

ÚVOD

V dnešní době se nekonvenční metody obrábění neustále vyvíjejí a čím dál častěji se využívají pro doplnění konvenčních metod výroby. Pro svou dostupnost a technickou nenáročnost je využívání CO₂ laserů v běžné výrobě velice vyhledávanou technologií. Zejména je to z důvodu nízké finanční náročnosti, snadné dostupnosti jednotlivých komponent, jednoduchého zaškolení obsluhy a produktivity výroby. Mezi nejrozšířenějšími druhy laserů patří lasery diodové, vláknové, diskové nebo CO₂ lasery. Práce je zaměřena na problematiku rozšíření využitelnosti CO₂ laserů pro možnost řezat a gravírovat rotační tvary.

Cílem této práce je zpracování konstrukčního návrhu inovované rotační osy. Hlavní kritéria kladená na inovovaný návrh bude konkurenceschopnost a univerzálnost. Výstupy práce předpokládají následnou implementaci osy do CO₂ laserové řezačky.

Dílní cíle práce jsou:

- Rešerše současných dostupných řešení a zhodnocení jejich výhod a nevýhod.
- Konstrukční návrh technologie pro substituci za lineární osu.
- Návrh a příprava výroby komponent pro sestavení rotační osy.
- Testování prototypu rotační osy, příprava testovacích vzorků a následné hodnocení.
- Závěry plynoucí z realizace problematiky.

1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční metody obrábění (dále jen NMO) se oproti jiným technologiím obrábění jsou odlišovány tím, že nevyužívají klasické dělení materiálu pomocí nástroje, ale naopak využívají procesy zakládající se na fyzikálních a chemických zákonitostech o narušování materiálu. Při této technologii nedochází k přímému kontaktu mezi obrobkem a nástrojem. Mezi nástroje tohoto specifického obrábění se zpravidla řadí tryska usměřující proud řezné kapaliny, vodivý drátek, elektroda apod. Nástroje mají především za úkol produkovat formu energie, díky které se v obráběném materiálu spustí erozivní reakce a tím dochází k oddělování, odpařování nebo obrušování materiálu. [1; 2]

NMO vznikly a rozšířily se v průmyslu z mnoha důvodů [1]:

- Materiál nástroje nemusí být tvrdší než materiál obráběný.
- Obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou například kalená ocel, žárupevné a žáruvzdorné oceli, keramika, kompozit nebo i sklo.
- Mechanické vlastnosti obráběného materiálu neovlivňují rychlost, možnosti a výkonnost obrábění.
- Možnost provedení kompletního obrobení i hodně složitých a nepravidelných tvarů, a to jak vnějších, tak i vnitřních.
- Možnost obrábění s velmi vysokou tvarovou i rozměrovou přesností.
- Umožnění zavedení plné automatizace a mechanizace a tím i zakomponovat danou operaci do výrobní linky.

Podle převládajících účinků oddělování materiálu lze rozdělit NMO do těchto třech hlavních skupin [1; 2]:

- a) Oddělování materiálu tepelným účinkem:
 - elektroerozivní obrábění (Electro Discharge Machining – EDM),
 - obrábění paprskem plazmy (Plasma Beam Machining – PBM),
 - obrábění paprskem laseru (Laser Beam Machining – LBM),
 - obrábění paprskem elektronů (Elektron Beam Machining – EBM).
- b) Oddělování materiálu chemickým nebo elektrochemickým účinkem:
 - chemické obrábění (Chemical Machining – CM),
 - elektrochemické obrábění (Electro Chemical Machining – ECM).
- c) Oddělování materiálu mechanickým účinkem:
 - ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining – USM),
 - obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – WJM),
 - obrábění hydroabrazivním paprskem (Abrasive Waterjet Machining – AWJ).

1.1 Vývoj nekonvenčních metod obrábění

Hlavním faktorem pro výzkum a vývoj této technologie byl požadavek řezat materiály, které nelze dělit za využití konvenčního obrábění. Z odborné literatury je patrné, že výzkum v oblasti NMO vykazuje širokou řadu nových možností jednotlivých technologií. Na druhou stranu využití v praxi často vázne. Některé novinky se však prosadí a některé novinky se naopak svého uplatnění nedočkají. Tento fakt vyplývá z neopodstatněných předsudků a neznalosti novinek ohledně NMO. [3]

Bouřlivým vývojem díky využití novinek prochází v Česku obrábění paprskem laseru (LBM). Tato skutečnost je dána především díky jisté tradici této metody. Podle statistik prodaných strojů, provedených studií, citací a dalších ukazatelů lze sledovat nepřetržitě rostoucí počet

nových případů v řadě oborů. V počátcích průmyslového využití laserů byl využíván pro vrtání diamantových raznic. Následně byl použit laser pro vytvoření systému umožňujících řezání i nekovových materiálů. Tato technologie však byla projita masivním vývojem, kdy byla zdokonalena nejen konstrukce řezacích laserových strojů, ale i aktivní prostředí, řídicí systémy, laserové zdroje, pohony, a postprocesory. V současnosti jsou nejvíce využívány pevnolátkové lasery s lineárními motory, díky kterým lze dosáhnout vyšších posuvových rychlostí. Největší popularitě se v současné době těší technologie, která je nazývána CO₂ laserové řezání. Tato technologie je provozována v řadě současných výrobních podniků, i když v posledních letech je enormní růst vláknových laserů. Vláknové lasery jsou využívány především v oblasti svařování. Dále díky svým nízkým provozním nákladům jsou zde rozšířeny diodové a diskové lasery. Tyto lasery jsou velkým konkurentem konvenčním metodám, a to především v oblasti kalení, navařování či napájení materiálů. Největší nárůst aplikací je očekáván především u vláknových, diodových a diskových laserů. Tyto lasery by měly postupně vytlačovat plynové lasery. Na obrázku 1 je znázorněna CO₂ laserová řezačka s názvem Goliáš. [3]

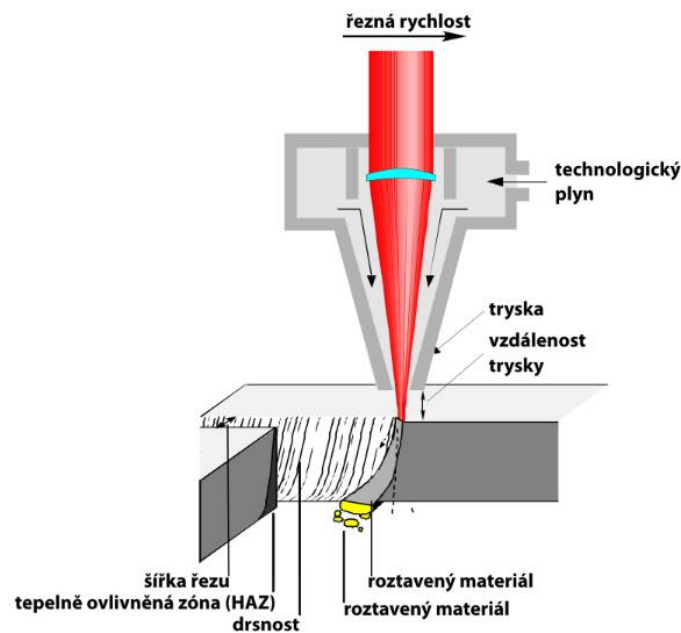


Obr. 1 CO₂ laserový řezací stroj s názvem Goliáš.

2 LASEROVÉ METODY OBRÁBĚNÍ – LBM

Z anglického popisu funkce pro laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), kdy využitím prvních písmen a zkrácením, vzniklo slovo laser. Překlad těchto čtyř anglických slov zní zesílení světla pomocí stimulované emise záření, jednoduše řečeno obrábění pomocí laseru, funguje na principu přeměny energie světelných paprsků na tepelnou energii. [1; 2]

Obrábění pomocí této technologie se prosadilo v mnoha odvětvích, například v medicíně, či pro kosmetické účely, dále v průmyslu zbrojním, zábavním, strojírenském, ve výpočetní technice. Ve strojírenské technice se LBM uchytilo, především kvůli svařování, vrtání, dělení a řezání materiálu, gravírování. Také se využívá při tepelném zpracování a povrchových úpravách. Princip laserového řezání je vyobrazen na obrázku 2. [4; 5; 6; 7]



Obr. 2 Princip laserového řezání [5].

2.1 Fyzikální princip laseru

Fyzikální princip laseru je velmi složitý a dopodrobna vyličený v kvantové fyzice, proto zde bude popsán velmi stručně pro lepší pochopení.

2.1.1 Vznik laserového paprsku

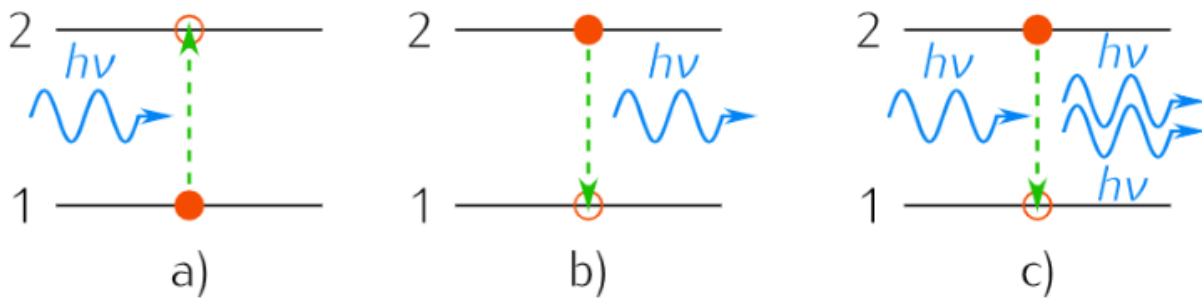
Laser jako takový je vytvořen na principu indukované emise neboli vynuceného záření. Tato emise je podnětována dopadem elektromagnetického záření na atom prvku. V té chvíli záření donutí elektron, který je obíhán kolem jádra, přijmout energii. Díky tomu elektron dokáže vystoupat na vyšší oběžnou dráhu a vzniká v atomu nerovnovážený stav. Následkem toho je elektron nucen přeskocit zpět do nižší valenční vrstvy a vyzáří se světelná energie rovnající se jednomu fotonu. Vzniklé záření je monochromatické, což znamená, že má jednu, přesně definovanou vlnovou délku. Vzniklé záření je také koherentní, to znamená, že fotony se ve svazku pohybují jedním směrem a v celém průřezu mají vysokou míru statické uspořádanosti. Světelné záření je děleno na infračervené, ultrafialové a viditelné. [1; 2; 4]

Výsledný koherentní paprsek světla je usměrněn na obráběný materiál, který je soustředěn na velmi malou plochu. V místě, kde paprsek dopadá, se energie světelného záření přeměňuje na energii tepelnou o hustotě energie řádově $10^8 \text{ W} \cdot \text{mm}^2$. Při této přeměně dochází také k nárůstu teploty, a to řádově až na $10^4 \text{ }^\circ\text{C}$. Tato teplota stačí k roztavení nebo až k odpaření obrobku. [1; 2; 4]

2.1.2 Absorpce, spontánní a stimulovaná emise záření

Základem každého laseru je aktivní prostředí. Jedná se o medium, které je schopno zesilovat jím procházející záření pomocí stimulované emise. Tento jev může nastat při interakci fotonu s atomem nebo molekulou. Jsou známy tři typy interakcí: absorpce záření, spontánní emise a stimulovaná emise záření. [8]

Jsou uvažovány dvě energetické hladiny 1 a 2 některého atomu daného materiálu s energiemi E_1 a E_2 ($E_1 < E_2$). Pro jednoduchost a vhodnost je hladina 1 považována za hladinu základní, tj. kvantový stav s minimální energií. Nejprve je uvažován atom, ležící na hladině 1, který má tendenci setrvávat na základní hladině do té doby, kdy není dodána nějakým způsobem energie. Podnětem ke změně jeho energetického stavu může být dopadající elektromagnetická vlna reprezentovaná fotonem. Pokud rozdíl $E_2 - E_1$ je roven energii jejich fotonů, pak energie je absorbována atomem a s konečnou pravděpodobností přejde na hladinu 2. Tento jev je nazýván absorpcí záření, viz obr. 3a. Nyní je předpokládán atom na hladině 2. Jelikož $E_2 > E_1$, atom má tendenci přejít do energeticky výhodnějšího stavu (s co nejnižší energií), tj. na základní hladinu. Atom se snaží snížit svoji energii o rozdíl $E_2 - E_1$. Pokud je energie vyzářena v podobě elektromagnetického záření, pak je tento děj označován jako spontánní emise, viz obr. 3b. Atom nacházející se na hladině 2 a současně na něj je dopadá elektromagnetická vlna s frekvencí spontánně emitované vlny, existuje zde nenulová pravděpodobnost, že dopadající vlna donutí atom přejít do stavu 1 za současné emise záření. Emitované a dopadající vlnění je směřováno stejným směrem. Vlnění jsou skládána a tím dochází k zesílení původního vlnění. Tento jev je nazýván stimulovaná emise záření, viz obr. 3c. [8; 9; 10; 11; 12]



Legenda: $h\nu$ – Vyzářená energie, E_1 – Základní stav, E_2 – Excitovaný stav

Obr. 3 a) absorpce záření, b) spontánní záření, c) stimulované záření [8].

2.2 Druhy laserů

Lasery se mohou dělit dle různých hledisek, nejčastěji jsou však tříděny podle laserového média [13; 14]:

- Pevnolátkové – aktivním prostředím je dielektrikum (pevná, opticky propustná látka) a základním materiálem je matrice. Matrice se vyznačuje především svojí průzračností, optickou homogenitou, a zároveň platí, že musí být technologicky uměle vyrobitelná.
- Plynové – aktivním prostředím je v plynné fázi. Existuje mnoho faktorů pro buzení plynového laseru, například: elektrický výboj, chemická reakce, fotodisociace, rychlá expanze plynu, průchod svazku rychlých elektronů nebo opticky.
- Kapalinové – aktivním prostředím jsou roztoky organických barviv, popřípadě speciálně připravené kapaliny, dopované ionty vzácných zemin. Pro buzení je využito optické záření.

3 CO₂ LASER

Základní konstrukce CO₂ laseru je stejná jako u jiných laserů a skládá se z aktivního média s přerozdělením atomových energetických hladin mezi dvěma zrcadly. Zrcadla tvoří jak stabilní, tak i nestabilní rezonátor, mezi nimiž osciluje záření. Směs je tvořena plyny, které se skládají z oxidu uhličitého, dusíku a hélia, tyto plyny mají příznivý vliv na homogenitu výboje nebo na procesy přenosu energie. [15; 16]

3.1 Parametry ovlivňující proces řezání

Proces laserového řezání a kvalita řezu je podřízena na správné volbě laserových parametrů. Existuje však mnoho okolností, které řezání laserem ovlivňují. Zde jsou vybrány a vypsány jen některé z hlavních.

3.1.1 Výkon a intenzita laseru

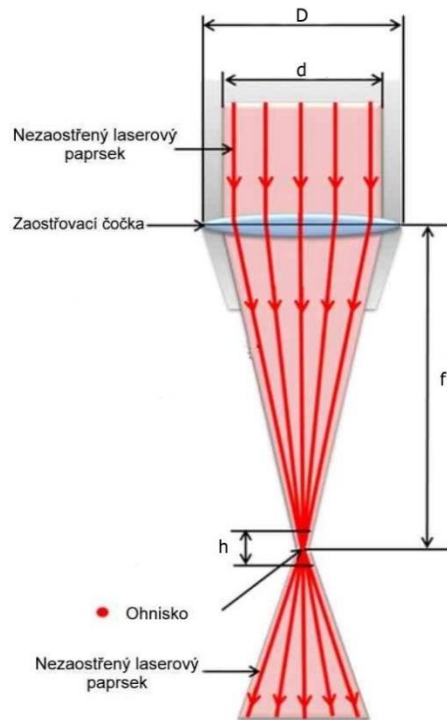
Výkon laseru je celková energie vyzářena ve formě laserového světla za sekundu, kdežto intenzita laserového paprsku je výkon dělený plochou, na kterou je výkon soustředěn. Žádoucím aspektem pro řezné aplikace je vysoká intenzita paprsku, která je získána soustředěním laserového paprsku do malé plochy, díky tomu je způsobeno rychlé zahřátí řezné hrany, zároveň je zachováno málo času na rozptýlení tepla do okolí, což vede k vysokým řezným rychlostem a zlepšené kvalitě řezu. [15; 16]

Optimální dopadající výkon se stanovuje během řezání. Nadměrný výkon má za následek velkou šířku řezné hrany, později dochází k přetavení a tím i k nárůstu množství strusky, zatímco nedostatečný výkon nemůže zahájit řezání. [15]

3.1.2 Ohnisková vzdálenost

Pro přenos paprsku u CO₂ laseru nejsou využívána optická vlákna, proto je paprsek vyzařovaný laserem zaostřen přímo na obrobek pomocí zaostřovací čočky. Při laserovém řezání je vyžadováno zaostření vysoce výkonného laserového paprsku na malý bod. [16; 17; 18]

Ohnisková vzdálenost, která je značena f , fokusační čočky je určena velikostí zaostřeného bodu a také hloubkou zaostření, což je efektivní vzdálenost, díky které lze dospět k uspokojivému řezu. Fokusovatelnost laserového paprsku je vyobrazena na obrázku 4, kde je hloubka ostrosti (h) znázorněna parametry, které určují velikost zaostřeného bodu. Hloubka ostrosti je závislá na stejných parametrech jako průměr zaostřeného bodu. Malá velikost bodu je spojena s malou hloubkou ostrosti. [17; 18]



Legenda: D – průměr objektivu [mm], d – průměr paprsku [mm], f – ohnisková vzdálenost [mm],
 h – hloubka ostrosti [mm]

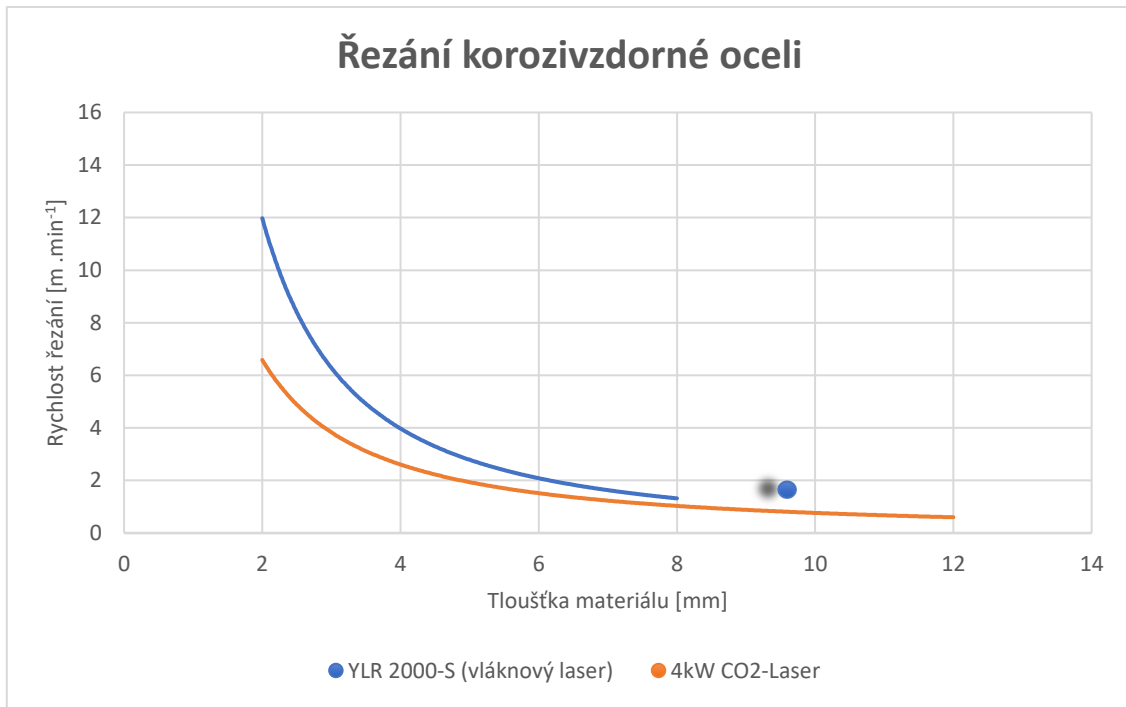
Obr. 4 Laserový paprsek a optické faktory [19].

K zajištění optimálního řezného výkonu je zapotřebí kontrolovat polohu ohniskové vzdálenosti, kde je nejmenší plocha, kam dopadá laserový paprsek. Zde se nachází největší koncentrace energie na plochu. Při řezání za pomoci inertního plynu se používají větší průměry trysek. Pokud je umístěna ohnisková rovina příliš hluboko pod povrchem vůči povrchu obrobku nebo naopak příliš vysoko, hrozí že, jak šířka prořezu, tak i tloušťka přetavené vrstvy se zvětší až do bodu, kdy hustota výkonu klesne pod hodnotu potřebnou k řezání. [17; 18]

3.1.3 Posuvová rychlost

Posuvová rychlost musí být vyvážena s průtokem plynu a výkonem. Se zvyšující se posuvovou rychlostí se na řezné hraně zvyrazňují pruhy a na spodní straně dochází s větší pravděpodobností ke vzniku zoxidovaného povrchu, díky čemuž se ztrácí penetrace. Obecně tedy platí, že posuvová rychlost pro daný materiál je nepřímo úměrná jeho tloušťce. [17; 18]

Na obrázku 5 je znázorněn graf v závislosti posuvové rychlosti na tloušťce materiálu (v tomto případě tloušťka korozivzdorné oceli). V grafu jsou vykresleny dvě křivky, kde oranžová křivka reprezentuje CO_2 laser a modrá vláknový laser. Z grafu je zřejmé, že u tenčích materiálů je posuvová rychlost vláknových laserů výrazně vyšší, a to i s polovičním výkonem. [5]



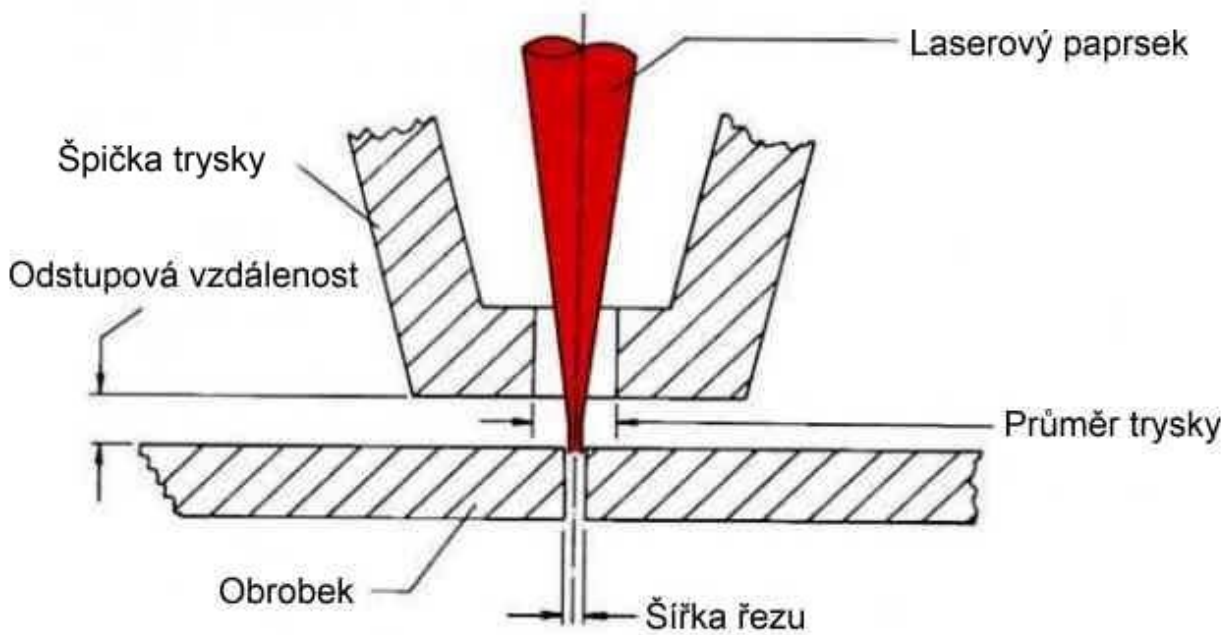
Obr. 5 Graf v závislosti řezné rychlosti na tloušťce materiálu [5].

3.1.4 Procesní plyn a tlak plynu

Procesní plyn při laserovém řezání je charakterizován pěti základními funkcemi. Aktivní plyn, jako je kyslík, se účastní exotermické reakce s materiálem, na druhé straně inertní plyn, např. dusík, vytlačuje roztavený materiál, aniž by umožnil jeho ztuhnutí na spodní straně neboli zabraňuje vytvoření zoxidovaného povrchu. Dále plyn působí na potlačení tvorby plazmatu při řezání tlustých řezů s vysokou intenzitou paprsku a fokusační optika je chráněna pomocí proudu plynu před rozstříkem. Proudem plynu je také chlazená řezná hrana. Produktivita a kvalita procesu laserového řezání je závislá na volbě procesního plynu. Tlak kyslíku v tryskách se pohybuje okolo 0,5–5 barů. Se zvětšující se tloušťkou řezného materiálu a průměrem trysky, se tlak kyslíku snižuje, kvůli předejití účinku hoření. [17; 18]

3.1.5 Průměr trysky a odstupová vzdálenost

Průměr trysky se volí podle materiálu a tloušťky desky. Tryska přivádí řezný plyn na řezné čelo tak, aby byl přiváděný plyn souosý s laserovým paprskem, dále stabilizuje tlak na povrchu obrobku, díky čemuž minimalizuje turbulence v tavenině. Konstrukce trysky určuje tvar proudu řezného plynu a tím i kvalitu řezu. Geometrie trysky je znázorněna na obrázku 6. Odstupová vzdálenost, je vzdálenost mezi obrobkem a tryskou. Průběh proudění plynu ovlivňuje právě tato vzdálenost, která má přímý vliv na kvalitu řezu i na řezný výkon. [17; 18]



Obr. 6 Geometrie trysky [17].

3.1.6 Materiál obrobku

Laser je používán k řezání širokého spektra různorodých materiálů. Materiály lze dělit do dvou skupin, a to do kovových a nekovových materiálů. Mezi kovové materiály patří, například hliníkové slitiny, slitina železa nebo super slitiny. Druhou skupinou jsou nekovové materiály. Zde se řadí keramika, sklo, dřevo, papír nebo plast. [17; 18]

Při řezání kovů se vyžaduje vyšší řezný výkon, aby se materiál roztavil. Naopak pro řezání nekovových materiálů je zapotřebí nižší řezný výkon. Fokusevané laserové záření dopadající na kovový povrch, je částečně absorbováno a částečně odrazeno kovovým povrchem. Podíl absorbovaného dopadajícího laserového výkonu (je určen odrazivostí kovového povrchu), se mění se zahříváním materiálu. Tepelné a fyzikální vlastnosti materiálu jsou důležité pro volbu správné kombinace laseru a materiálu. [17; 18]

3.2 Typy CO₂ laserů

Ve strojírenském odvětví jsou využity lasery buzené buď elektrickým výbojem nebo radiofrekvenčně. Z pohledu uzavřenosti rezonátoru se dělí na tzv. průtočné lasery, kde plyn rezonátorem neustále proudí (tento jev je nutný u vysokých výkonů ~10 kW) a na tzv. sealed off lasery s hermeticky uzavřeným rezonátorem. Nejčastěji používané lasery do výkonů 5kW jsou DC RF CO₂ lasery (difuzně chlazené, RF buzené). Buzení aktivního plynu se provádí radiofrekvenčním vlněním. To probíhá mezi dvěma elektrodami, které současně zajišťují díky svojí velké ploše difuzní chlazení plynu. Mezi největší přednosti patří vysoká spolehlivost, dlouhá životnost a nízké provozní náklady. [20]

CO₂ LASERY S POMALÝM PROUDĚNÍM (SLOW AXIS LASER)

Jsou to nejstarší CO₂ lasery s pomalým prouděním plynů rezonátorem. Energie aktivnímu prostředí je přivedena buď pomocí stejnosměrného nebo střídavého elektrického výboje. Výboj je směřován shodně s osou rezonátoru (optická dutina vymezená zrcadly) a svazku vystupujícího záření. V těchto laserech je dosažen výkon okolo 50 W na jeden metr délky

výbojové trubice v rezonátoru. Výstupní výkon na metr délky rezonátoru je limitován možností chlazení. Je zde dosaženo dobré modové charakteristiky svazku záření a stabilního výstupního výkonu. Příčinou je hladký a jakostní řez. Provoz je kontinuální a pulsní. [14; 21]

CO₂ LASERY S RYCHLÝM PROUDĚNÍM (FAST AXIS LASER)

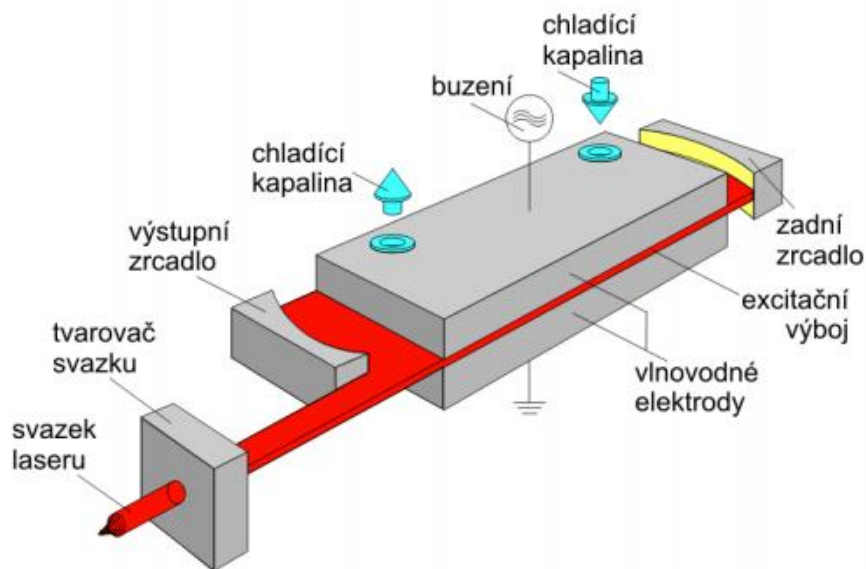
Zde aktivní plyn proudí dutinou laseru vysokou rychlostí. Mimo dutinu rezonátoru se odehrává potřebné chlazení plynu a jeho regenerace. Výkon dosahuje 500 až 1000 W na jeden metr délky rezonátoru, a to díky kompaktnosti konstrukce. Výsledná modová struktura svazku záření je dobrá, ale často dochází k rychlým fluktuacím modu, což vede ke zhoršení kvality řezu. Elektrické napájení je buď stejnosměrné nebo vysoce frekvenčně střídavě (u RF – excitované lasery). [14; 22]

CO₂ LASERY S PŘÍČNÝM PROUDĚNÍM (TRANSVERSE FLOW)

Tento typ se pyšní svojí kompaktní konstrukcí, kdy laserový svazek, proudění plynu a elektrický výboj jsou šířeny ve třech různých směrech. Výkon vyšplhá až na 1 kW na metr rezonátoru, na úkor přesnosti řezání, proto jsou lasery tohoto druhu spíše využívány pro svařování a tepelné zpracování. [14; 23]

SLAB LASERY

SLAB lasery vytvářejí plazma v relativně malém prostoru lichoběžníkového průřezu mezi dvěma paralelními deskami. Zkratka SLAB je označována jako tvar výboje. Výboj je udržován velkými elektrodami, které jsou využity pro chlazení směsi a jsou základnou výboje. Lasery typu SLAB jsou vícenásobně výkonnější než konvenční lasery. Schéma SLAB laseru je vyobrazeno na obrázku 7. [14; 24]



Obr. 7 Schéma SLAB laseru [25].

3.3 Gravírování pomocí CO₂ laseru

Gravírování a značení pomocí laserové technologie je dnes představováno jako nejjednodušší a zároveň efektivním způsob vytvoření nápisů či grafiky do široké škály materiálů. Hlavními výhodami gravírování a značení jsou vysoká rychlost, naprostá přesnost, téměř nulové tepelné

ovlivnění materiálu, nesmazatelnost a flexibilita celého procesu. Tato technologie je bezkontaktní, což je obrovská výhoda. Díky bezkontaktnosti je zajištěna bezprašnost procesu. [26; 27; 28]

Při laserovém gravírování je značení nanášeno pomocí kombinovaného ubírání tavením a odpařováním. Hustota výkonu laserového paprsku je velmi vysoká a díky tomu je materiál během obrábění roztaven a částečně odpařen. V materiálu jsou tak vytvořeny prohlubně neboli laserová gravura. Hloubka gravury je od 10 do 50 μm . Prohlubeň má U tvar. Čím hlouběji se laser zářívá do materiálu tím je tvar užší, neboť roztavený kov není možno zcela odstranit. Díky tlaku páry odpařujícího se materiálu je roztavený kov odveden na okraj a při následném ochlazení ztuhne a je vytvořen otřep. [28; 29]

HLOUBKOVÁ GRAVURA

Za hluboké gravírování je považováno gravírování, při kterém jsou odebrány vrstvy materiálu a je vytvořen trojrozměrný reliéf. Pro dosažení požadované hloubky je nutno opakovat tento proces. Hloubková gravura je vytvořena při výrobě nástrojů a razidel, nebo i v případě identifikačních čísel vozidla, viz obr 8. V tomto případě je nutné nanést laserovou gravuru s větší hloubkou, a to až v milimetrovém rozsahu. [28; 29]



Obr. 8 Hloubková gravura [29].

ČERNÁ GRAVURA

Černá gravura při laserovém gravírování kovů je vytvořena interakcí roztaveného základního materiálu s atmosférickým kyslíkem oxidu, kdy se oxidy barevně přemísťují. Barva gravury je závislá na aritmetické úchylce povrchu. Větší část světla je absorbována u kovů s drsnějším povrchem, díky tomu je označení obvykle černé, viz obr 9. U hliníku může vnikat tmavě šedá barva a u mosazi nebo oceli tmavě hnědá barva. [29]



Obr. 9 Značení ozubeného kola černou gravurou [29].

BÍLA GRAVURA

U bílé gravury je povrch materiálu lehce nataven. Vzniká tak hladký a silně odrazivý povrch. Bílé značení se objevuje při gravírování materiálu jako je pozinkovaná ocel. U tohoto značení je využíváno malého průniku laseru do materiálu. Díky tomu zůstává proces bez porušení a povrch obrobku je odolný vůči korozi. Tato gravura je užita především na tmavých kovech (jako je tvrzená ocel), kde krásně vyniká, viz obr 10. [29]



Obr. 10 Bílá gravura na tvrzené oceli [29].

3.4 Charakteristika gravírovacího laseru dle druhu materiálu

Vztah mezi vlastnostmi materiálu a laseru je nedílnou součástí pro výběr optimálního laserového systému. Vzájemné působení laseru s obráběným materiálem je dáno absorpcí

materiálu a jeho termodynamickými vlastnostmi. Absorpce je závislá na vlnové délce použitého laseru. [30; 31]

KOVY

Kovové materiály jsou tepelně odolné. Pro gravírování do kovů je vyžadováno vytvoření vysoké hustoty energie pomocí laserového zařízení. CO₂ lasery se pyšní delší vlnovou délkou oproti jiným laserům. Tento fakt má za následek vyšší odrazivost, která se blíží k 99 %. I přesto je stále CO₂ laser nejpoužívanějším laserem pro řezání kovových desek, díky skutečnosti, že odrazivost kovu klesá při zvýšení jeho teploty, což má za následek laserové svařování, značení a řezání. [30; 32]

ORGANICKÉ MATERIÁLY

Mezi nejznámější organické materiály se řadí především dřevo. Značení těchto materiálů je založeno na karbonizaci materiálu. Karbonizace způsobuje ztmavnutí povrchu a stopy s vysokým kontrastem. CO₂ lasery využívají střední infračervenou vlnovou délku, která má velmi dobrou absorpci, tudíž je velmi dobrou volbou pro práci s organickými materiály. [30]

PLASTY

Každý plast se odlišuje jinými vlastnostmi materiálu, z důvodu přidáváním přísad jako jsou barviva, stabilizátory, maziva. Přísady zapříčiní změnu barvy, zlepšení odolnosti proti ultrafialovému záření, zlepšení trvanlivosti nebo další zdokonalení. Při výběru laseru je dbáno především na absorpci spektra světla. Laserové záření dokáže vyvolat přímé chemické změny, konkrétně odpařování a tavení materiálu. CO₂ lasery jsou využívány pro svoji účinnost při gravírování nebo odstraňování plastů. [30]

SKLO

Sklo je známo svojí křehkostí a při zahřívání laserem vytváří termomechanické efekty, které způsobují mikrotrhliny. Vyznačené znaky v průhledném skle jsou viditelné v tepelně ovlivněných zónách, díky rozptýlenému světlu v mikrotrhlinách. Řezání skla laserem se příliš neaplikuje. CO₂ lasery se používají pro trvalé značení skla. [30]

KERAMIKA

Mezi základní vlastnosti keramiky je řezana vysoká tvrdost, vysoká teplota tání a křehkost. Do keramiky jsou přidávány přísady (jako u plastů), často to jsou nečistoty. Tento materiál se kvůli křehkosti neřeže, naopak se pomocí laseru spíše označuje. [30]

4 PRŮZKUM TRHU

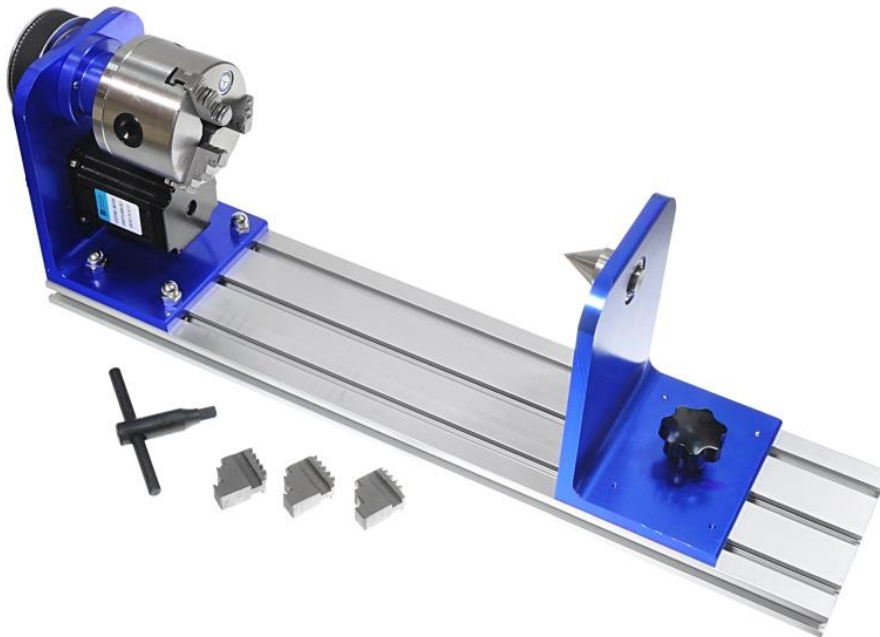
Po průzkumu konkurence na trhu byly vybrány tři různé typy rotačních os v cenové relaci do 10 000 Kč. Každá z vybraných os se liší svojí konstrukcí a upnutím obrobku. Prvním konkurentem je Rotační osa pro laserové plotry CO₂ 4060 od české firmy Pajtech. Druhá osa se nazývá Rotační osa na válečkové plošině od americké firmy OMTech. Poslední rotační osa pro CO₂ laser se nazývá CO₂ rotační osa s koly a je vyráběna v Čínské lidové republice firmou Ultrarayc. Všechny rotační osy jsou poháněny krokovým motorem NEMA 17.

4.1 Rotační osa pro laserové plotry CO₂

Osa od firmy Pajtech má parametry 540 × 120 × 190 mm. Nejpatrnějším rozdílem od navrhované osy je upnutí obrobku na osu. Na tento produkt se obrobek upíná do sklíčidla, viz obrázek 11. Průměr hlavy sklíčidla je 80 mm. Maximální průměr obrobku na upnutí je 110 mm a maximální délka obrobku může být 300 mm. Pro připojení do zdroje slouží čtyř pinový konektor. [33]

Mezi klady se řadí maximální rozměry pro upnutí obrobku. Dále po upnutí nehrozí pohnutí nebo spadnutí obrobku při gravírování, protože spojení mezi sklíčidlem a obrobkem je velmi tuhé. [33]

Mezi zápory se řadí nemožnost nastavitelnosti výšky, a tak vyrovnání obrobku do jedné linie. Tudiž nelze gravírovat na této ose vypouklé obrobky. Další nevýhodou je posuv v x-ovém směru. Posuv je myšlen přes matice v drážkách hliníkových profilech. Zde může dojít k vyosení koníka. [33]



Obr. 11 Rotační osa od firmy Pajtech [33].

4.2 Rotační osa na válečkové plošině

Rotační osa od firmy OMTech store z USA je velká 380 × 156 × 80 mm. Obrobek se zde neupíná, nýbrž obrobek je položen na dva rotační válečky, viz obrázek 12. Obráběcí plocha válečků je 264 × 80 × 60 mm. Pro připojení do CO₂ rezačky je zde čtyř pinový konektor jako

v předšlém případě. Tento produkt je kompatibilní se všemi laserovými gravírovacími stroji o výkonu 50 W a vyšším. U této osy spíše převažují negativa než pozitiva. [34]

Velikou výhodou jsou malé rozměry v šířce a výšce, tudíž se dokáže vpassovat do většiny CO₂ řezaček. Dalším plusem této osy je možnost změna roztečí mezi pohyblivými válečky. [34]

Obrovskou nevýhodou této osy jsou chybějící dorazy. Díky nepřítomným dorazům se může obrobek nepatrně pohnout a znekválnit tak výsledné gravírování. Jako u předešlé rotační osy se ani zde nedají gravírovat obrobky s proměnlivým vnějším průměrem. Další nevýhodou je zmiňovaná výška. Díky malé výšce, která je pevná, není možné gravírovat sklenice nebo hrnky s uchem po celé možné ploše. [34]



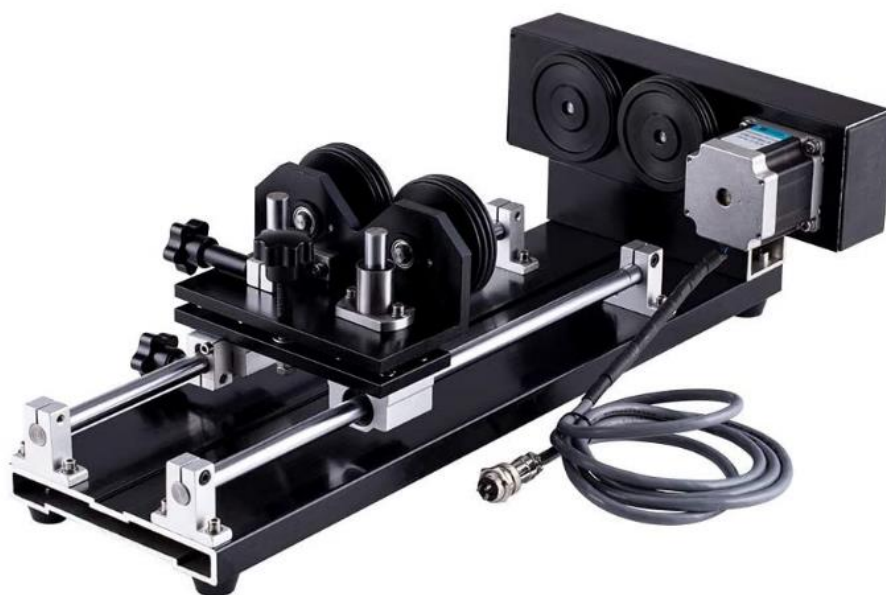
Obr. 12 Rotační osa od firmy OMTech store [34].

4.3 Rotační osa s koly

Rotační osa z čínské firmy Ultrarayc, která je vyobrazena na obrázku 13, má rozměry 490 × 260 × 160 mm. Tato osa je největší z doposud zmíněných. Gravírovací plocha je 300 × 140 × 160 mm. Průměr obrobku, který se dokáže vpassovat na osu, je v rozmezí 10-150 mm a délkově mezi 50-350 mm. Pro upnutí obrobku slouží čtyři kolečka, která jsou určena pro posazení obrobku na osu (dvě na každé straně). Kolečka mají průměr 70 mm. [35]

Velké pozitivum této osy je posuvný pohyb v X-ovém směru. Tento posuv je realizován pomocí lineárních ložisek. Pro vymezení dalšího pohybu v tomto směru je zde nainstalován šroub s plastový madlem. Další výhodou je možnost úpravy výšky koleček na jedné straně osy. To zapříčiní možnost gravírovat na obrobky, které mění svůj vnější průměr. Díky tomuto posuvu se dokáže dostat stěna do roviny vůči laseru. [35]

Nevýhodou jsou zde chybějící dorazy. Díky této nepřítomnosti může dojít k nezkválnění procesu gravírování. Dalším negativem je absence změny rozteče u koleček. Změna rozteče slouží pro snadnější docílení roviny vůči laseru. [35]



Obr. 13 Rotační osa od firmy Ultrarayc [35].

4.4 Porovnání všech os

Přehled konstrukce vytipovaných os je shrnut v tabulce 1. Z tabulky vyplívá, že rotační osa číslo tři má nejuniverzálnější parametry. Pro úplnou dokonalost by bylo zapotřebí přidat chybějící dorazy pro zlepšení gravírovacího procesu. Rotační osa číslo dva se zaměřuje především na obrábění obrobku s neproměnlivým vnějším průměrem. Proto je u této osy absence dorazů, které nejsou až tak důležité. Velkým negativem jsou chybějící o-kroužky na válečkách. Pomocí o-kroužků je zamezeno proklouznutí obrobku. Rotační osa číslo jedna se liší oproti ostatním vybraným osám svým uchycením obrobku. Do této osy se obrobek uchycuje do sklíčidla. Největší negativum je chybějící nastavitelná výška upnutí. Tato absence zamezí možnost gravírovat sklenice o velkých průměrech s uchem.

Tab. 1 Porovnání vybraných os dle žádoucích parametrů

Parametry	Rotační osa č.1	Rotační osa č.2	Rotační osa č.3
Dorazy	NE	NE	NE
Nastavitelná délka	ANO	NE	ANO
Nastavitelná výška upnutí	NE	NE	ANO
Nastavitelná šířka upnutí	NE	ANO	NE
Možnost proklouznutí obrobku	NE	ANO	NE

Možnost gravírovat různé rotační tvary na vybraných osách je shrnuto v tabulce 2. Z tabulky je možno vydedukovat, že nejméně univerzální osa je osa číslo dva, která se nazývá osa na válečkové plošině. Dle tabulky je zřejmé, že na rotační ose číslo tři je možno gravírovat obrobky různých tvarů. Je to především díky své konstrukci. Avšak díky krátké délce osy X je zde nemožnost gravírovat lahve od vína. Z důvodu nízkosti rámu je zde i nemožnost gravírovat püllitry s uchem. Osa číslo jedna (osa se sklíčidlem) není o mnoho horší než osa číslo tři. Na ose se sklíčidlem není možno gravírovat sklenice s proměnlivým průměrem ani püllitry s uchem.

Tab. 2 Porovnání vybraných os dle možnosti gravírování různých rotačních tvarů

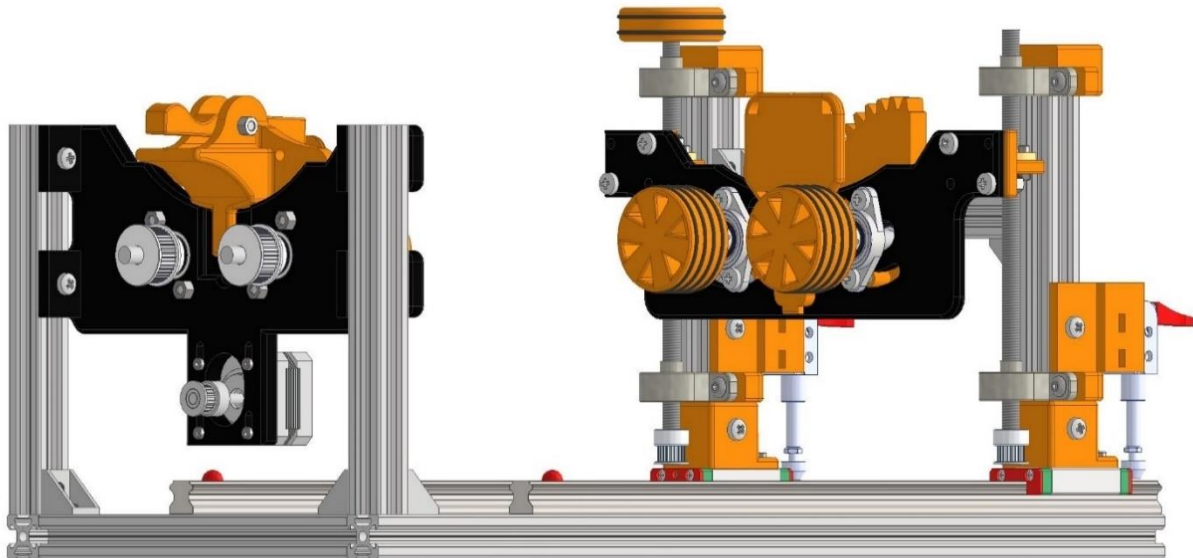
Různé tvary obrobku	Rotační osa č.1	Rotační osa č.2	Rotační osa č.3
Plechovky	ANO	ANO	ANO
Lahve	ANO	ANO	ANO
Půllitry bez ucha	ANO	ANO	ANO
Půllitry s uchem	NE	NE	NE
Sklenice na víno	ANO	NE	NE
Sklenice s proměnlivým průměrem	NE	NE	ANO

5 NÁVRH A REALIZACE INOVATIVNÍ ROTAČNÍ OSY

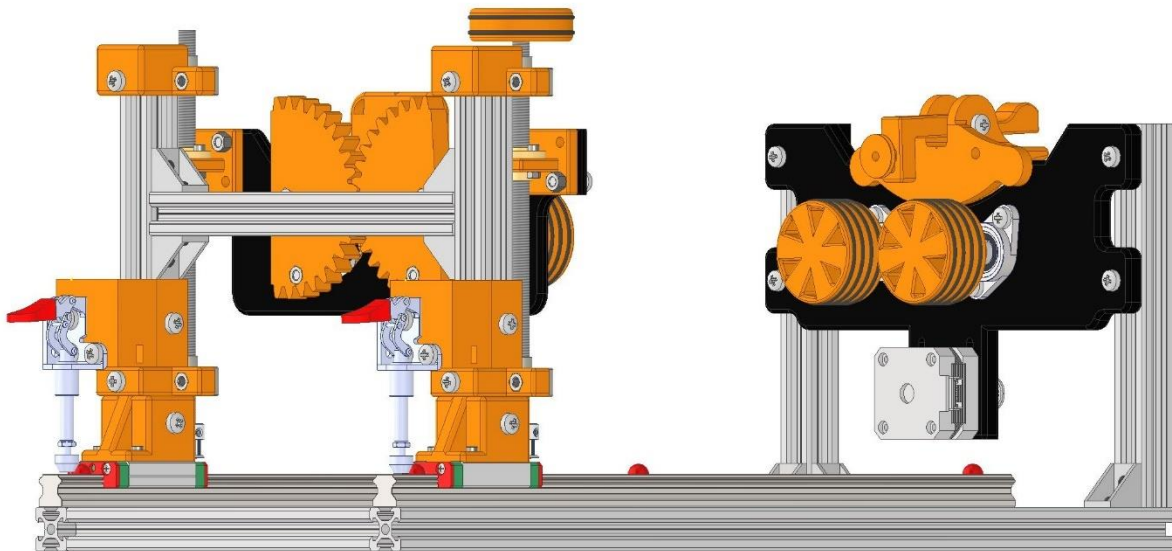
Jednou z problematik CO₂ laserových řezaček a gravírovaček je nemožnost obrábět či gravírovat válcové/rotační polotovary na standartních strojích. Jednou z možností, jak obrábět tyto obrobky je možnost implementace rotační osy místo jedné ze základních os. Zde se pohyb řídí lineárními krokovými motory. Jedna z možných variant, jak nahradit tuto osu, která má pohyb přímkový, je možnost nahradit ji osou čistě rotačního charakteru, která umožní obrábění či gravírování rotačních ploch. Cílem této práce bylo vytvoření rotační osy pro již existující laserovou řezačku Goliáš. Dalším cílem byl průzkum trhu, především zjistit konstrukční řešení, jejich výhody (vhodnost pro různé tvary rotačně symetrických obrobků) a také jejich limity. Dalším kritériem byla možnost implementace navržené osy do již existujících laserových řezaček.

5.1 Návrh konstrukce osy

Po prostudování konkurenčních výrobků byly určeny specifikace budoucí rotační osy. Hlavním kritériem pro návrh konstrukce a celého řešení bylo vytvořit rotační osu stavebnicové charakteristiky, aby si zákazník sám dokázal sestavit a odladit navrhovanou rotační osu. Návrh a výroba konstrukčních řešení jednotlivých dílů byly uzpůsobeny především s důrazem na jednoduchost a s co nejvíce prvky vlastní výroby z důvodu snížení nákladů na výrobu. Převážná část dílů rotační osy byla vyrobena pomocí technologie 3D tisk z důvodu změn v designu a rychlého prototypování. Osa byla nejprve vytvořena jako 3D model, viz obr 14 a 15. Navrhovaná osa má rozměry 600 × 200 × 175 mm.



Obr. 14 3D model navržené rotační osy.

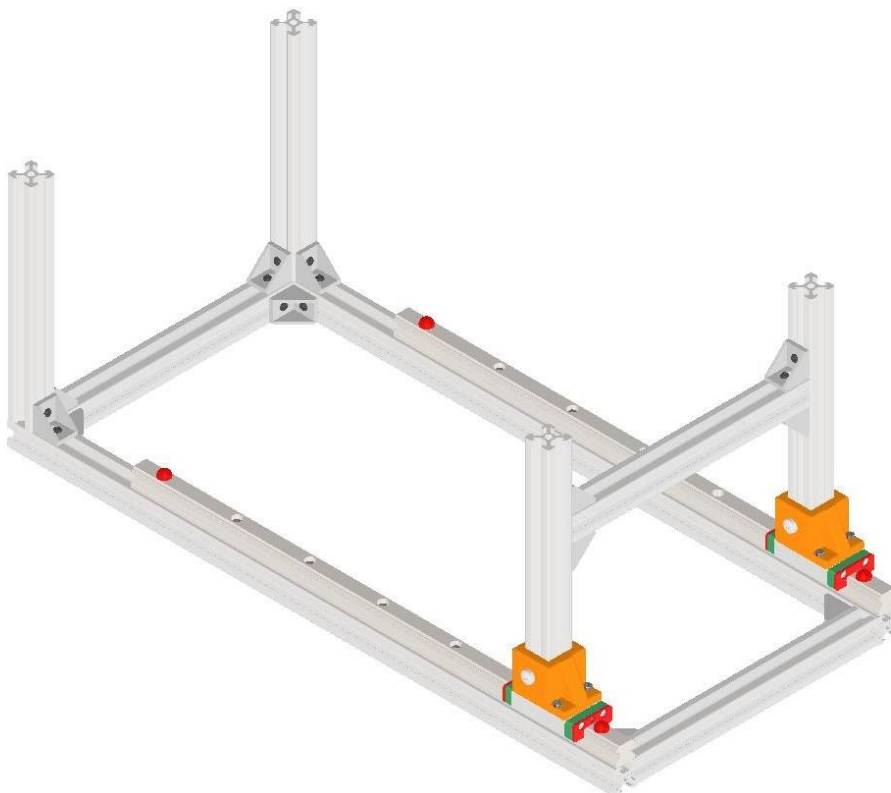


Obr. 15 3D model navržené rotační osy.

5.2 Popis konstrukčních celků

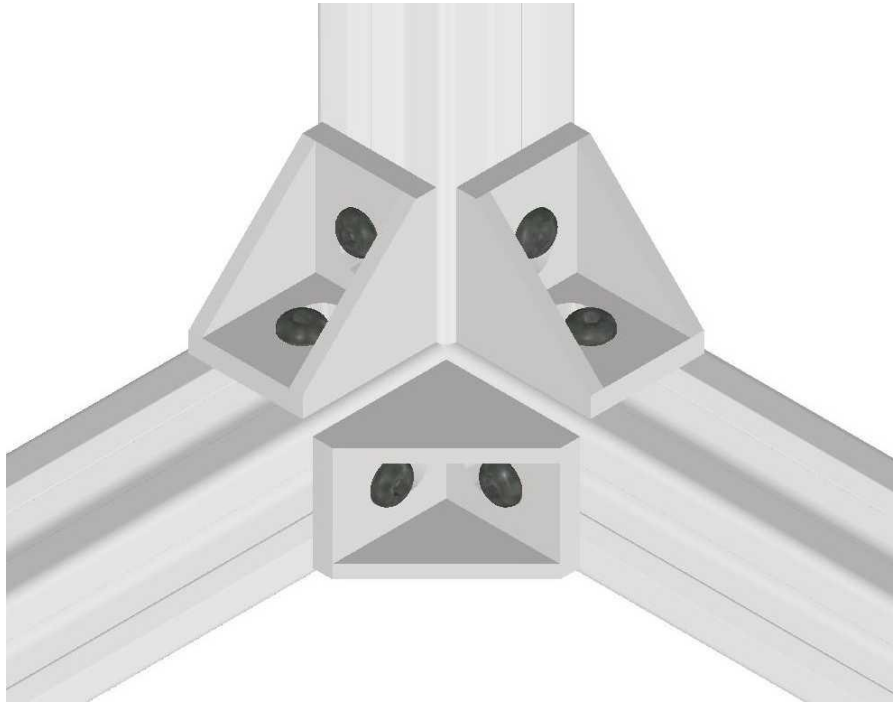
5.2.1 Rám rotační osy

Rám rotační osy byl vytvořen z hliníkových profilů. Z katalogu byly vybrány profily o rozměrech 20×20 mm s T drážkou. Tyto profily byly vybrány z důvodu vysoké pevnosti a nízké hmotnosti. Pro sestavení rámu bylo použito 2500 mm hliníkových profilů. Rám rotační osy je vyobrazen na obrázku 16.



Obr. 16 Rám rotační osy.

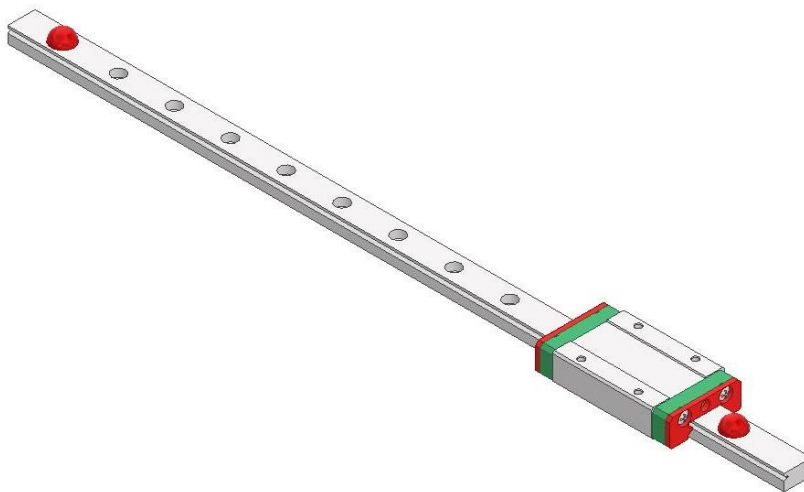
Na spojení profilů do požadovaného tvaru byly využity spojovací trojúhelníkové hliníkové rohy o rozměru 20 × 20 mm. Tyto spoje byly využity z důvodu dosažení celkové geometrické přesnosti a tuhosti rámu, viz obr 17. Trojúhelníkové rohy byly přimontovány pomocí šroubu a speciálních matic, které byly vsunuty do profilů.



Obr. 17 Spojovací trojúhelníkové hliníkové rohy.

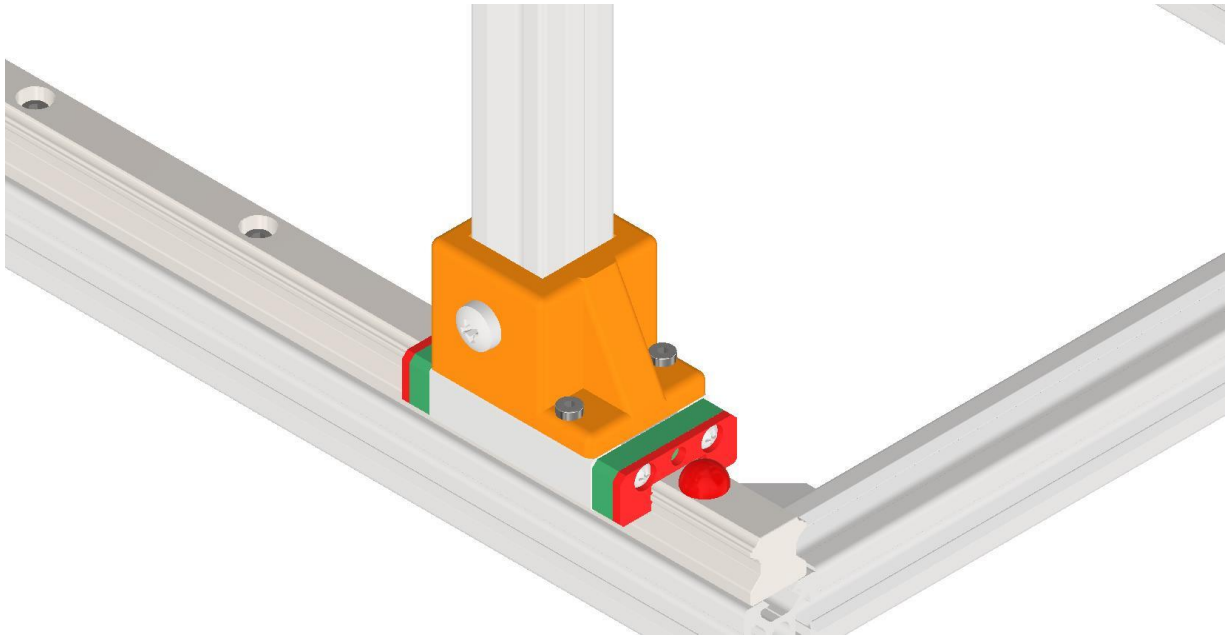
5.2.2 Lineární vedení

Z důvodu proměnlivých délek obrobků byla rotační osa rozdělena na dvě části, z nichž jedna je nepohyblivá a u druhé je pohyb řešen pomocí lineárního vedení s vozíkem MGN15H, viz obr 18. Toto vedení zajišťuje bezúdržbovost, běh na sucho, odolnost vůči nečistotám (prach, vlhkost), samomaznost, tichost apod. Mezi pohyblivým vozíkem a pojezdem dochází k zanedbatelným vůlím.



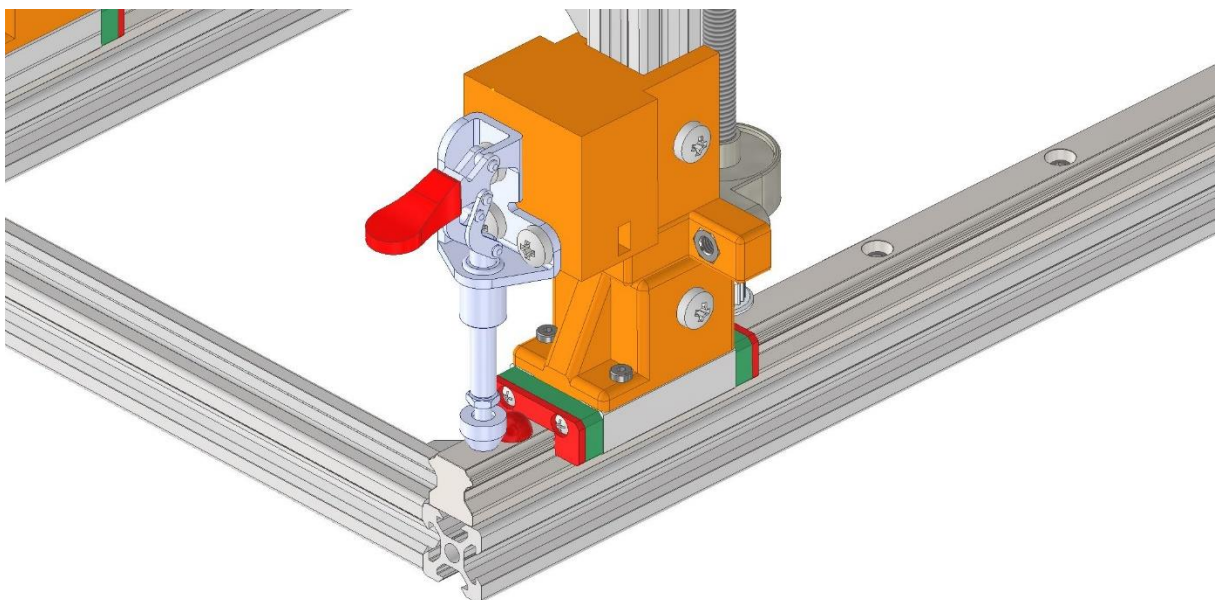
Obr. 18 Lineární vedení s vozíkem MGN15H.

Vozík, který se nasouvá na lineární vedení, byl doplněn o úchyt na profil, viz obr 19. Tuhé a přesné spojení mezi vozíkem, úchytem a profilem bylo vytvořeno za pomoci šroubových spojů. Díky tomuto úchytu je zajištěna geometrická přesnost, a především následná souosost mezi rotačními rolny, na kterých bude položen obrobek.



Obr. 19 Úchyt přichycený na vozíku.

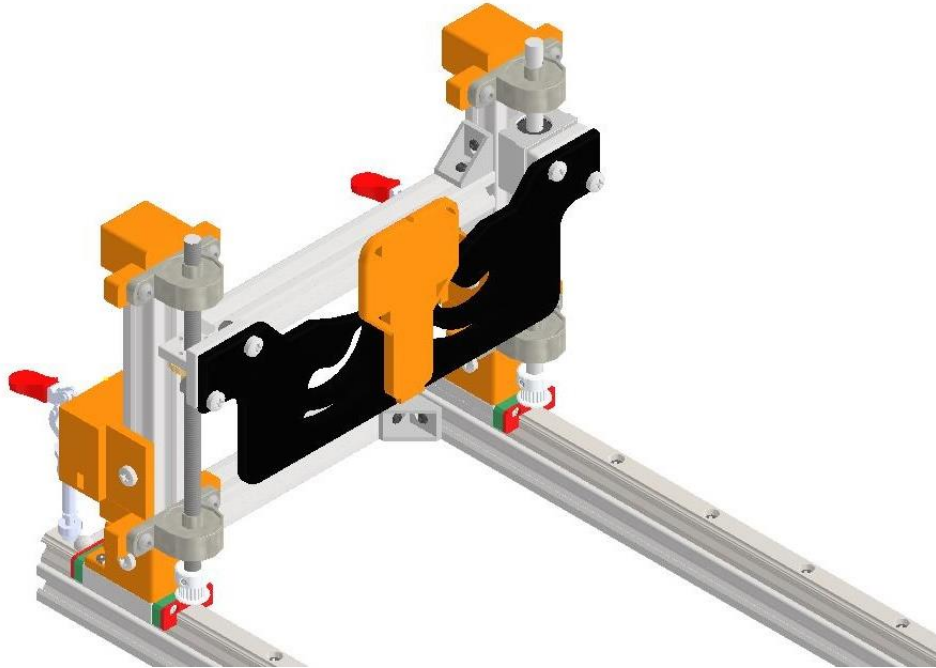
Z důvodu pohyblivosti jedné z přírub pro nastavování délek obrobku bylo potřeba navrhnout a vyrobit úchyty pro protiskluzové vertikální kloubové svorky, viz obr 20. Tyto svorky zaručí zaaretování pohyblivé příruby a vymezi tak vzdálenost mezi přírubami, která je řízena délkou obrobku. Vertikální svorky byly vybrány z důvodu vysoké únosnosti a také snadnosti implementace do celého návrhu. Jiné druhy svorek by bylo velmi obtížné zakomponovat na navrhovanou osu.



Obr. 20 Připevněná vertikální svorka k profilu.

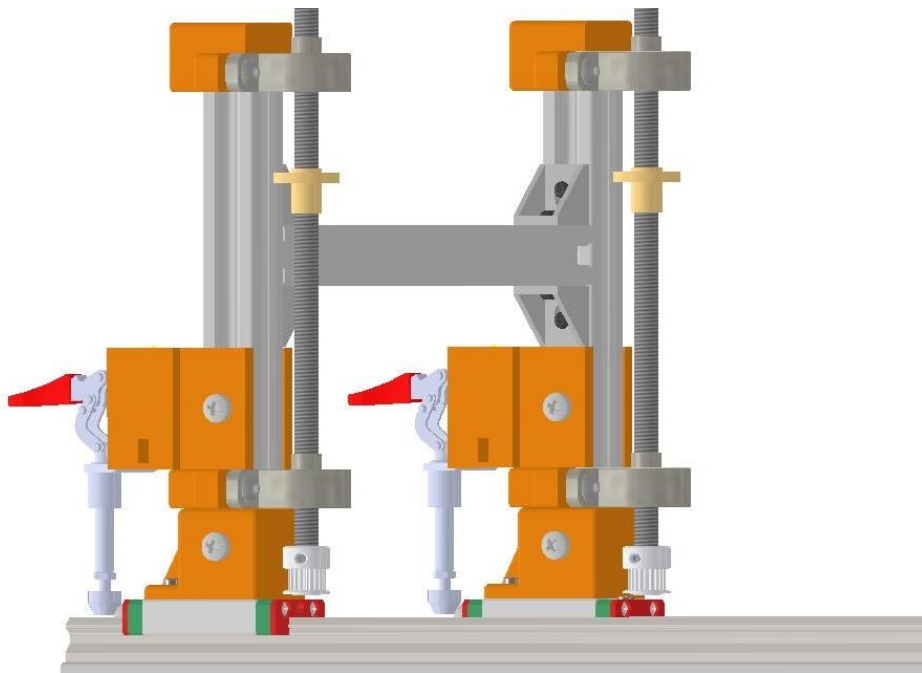
5.2.3 Posuvný pohyb příruby v ose Z

Nejdříve byl navrhnut a odzkoušen pohyb příruby v ose Z pomocí trapézového šroubu s maticí na jedné straně pohyblivé příruby a na druhé straně pomocí lineárního vedení (typu lineárního ložiska a vodící hřídele), viz obr 21. Toto řešení bylo nevyhovující z důvodu zadrhávání při pohybu v kladném směru osy Z. Důvodem zpříčení byla nesouosost mezi trapézovým šroubem a lineárním vedením.



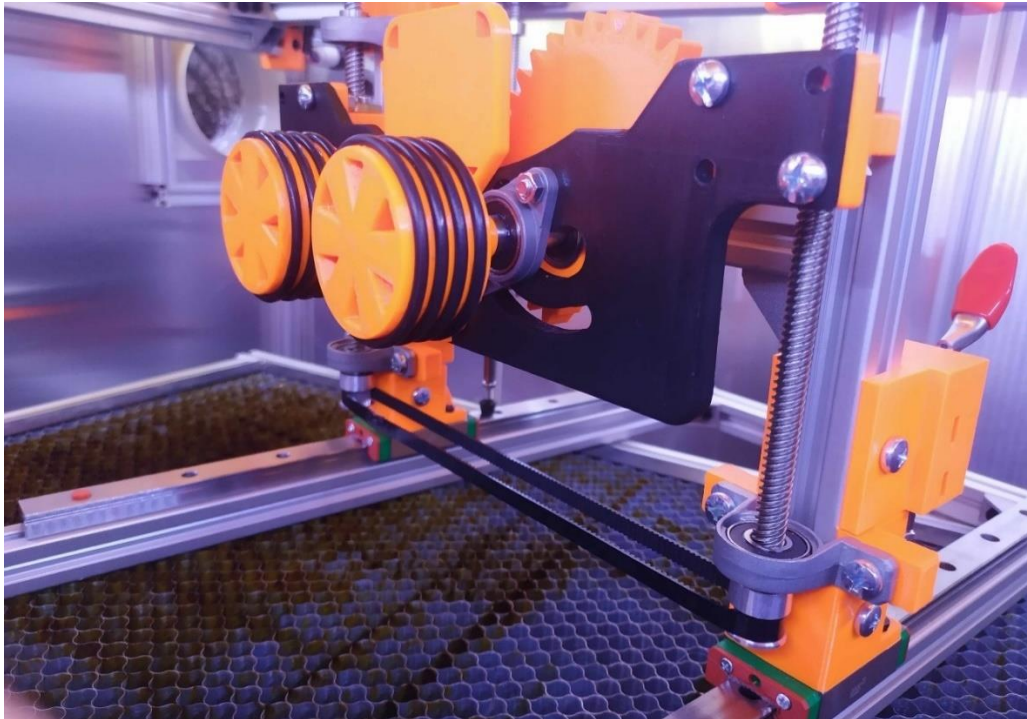
Obr. 21 Posuvný pohyb pomocí lineárního ložiska a trapézového šroubu.

Z důvodu nevyhovujícího předchozího řešení byla hřídel s lineárním ložiskem zaměněna za trapézový šroub s maticí. Tento posuv byl tedy vyřešen pomocí dvou trapézových šroubů, viz obr 22. K rámu byly přimontovány jednotlivé držáky, které slouží k uchycení stojatých kuličkových ložisek, do kterých jsou zasazeny trapézové šrouby.



Obr. 22 Posuvný pohyb pomocí dvou trapézových šroubů.

Pro hladký a synchronní chod obou trapézových šroubů byl použit řemenový převod, viz obr 23. Na druhý konec jednoho šroubu bylo vytisknuto a následně nasunuto kolečko. Toto kolečko slouží k nastavení výšky desky, především pro vyrovnání obrobku s různými vnějšími průměry, aby byla zachována vodorovná osa rotace. Toto řešení následně zaručí kolmost mezi obráběnou plochou a laserem.



Obr. 23 Řemenový převod pro synchronní chod.

5.2.4 Pohyblivá příruba

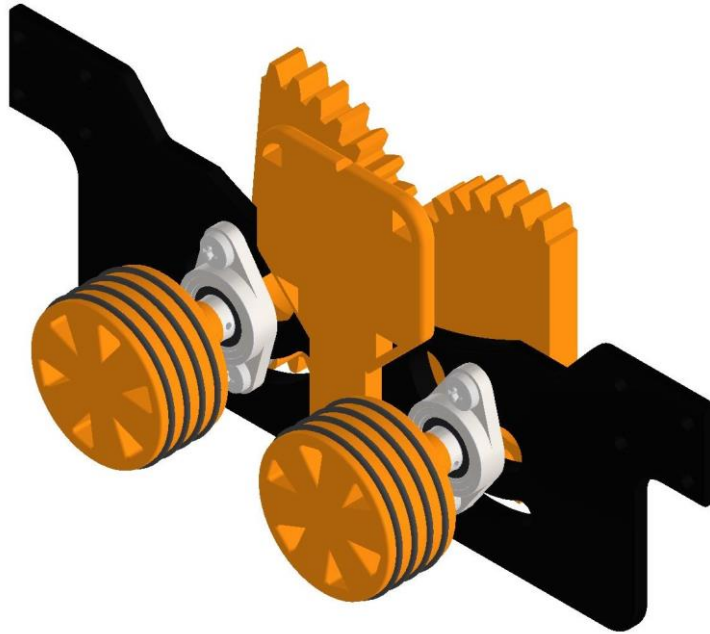
Příruba byla navržena a následně vyrobena pomocí 3D tisku, viz obr 24. Z důvodu zamezení pohybu v ose X byly navrženy a vytištěny dorazy, které byly zasazeny do středů přírub. Toto řešení přispívá k celkovému zlepšení kvality gravírování. Příruba mimo jiné disponuje dvěma dírami a středově soustředěnými drážkami ve tvaru kruhových výsečí. V dalším odstavci bude toto řešení vysvětleno.



Obr. 24 Pohyblivá příruba zepředu.

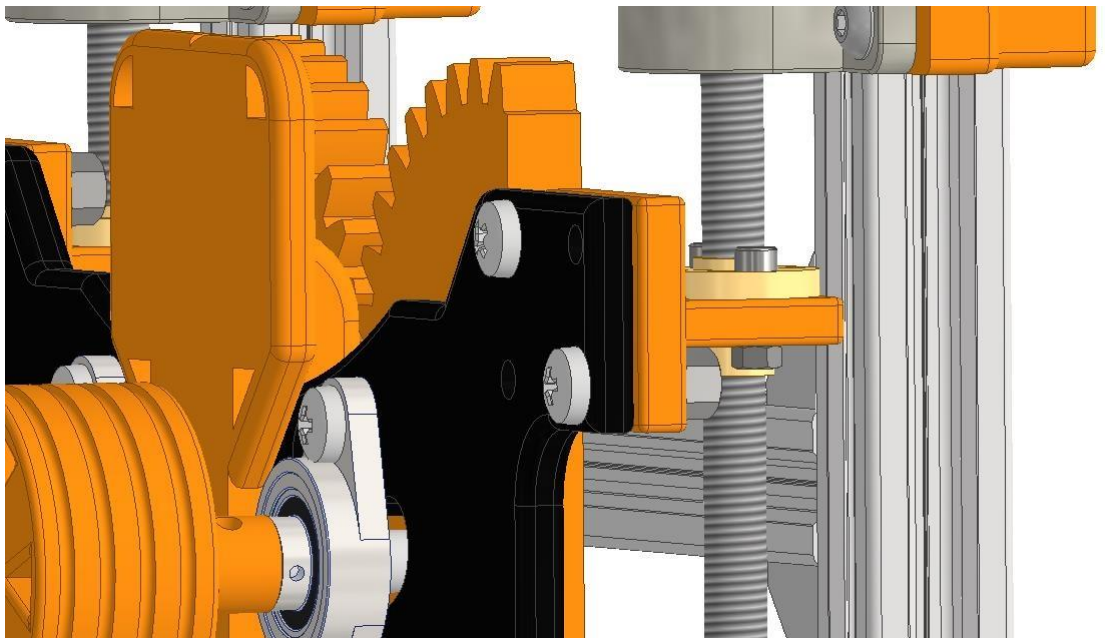
U navržené osy nedochází k obvyklému upínání obrobku, ale obrobek je položen na rotační rolny. Rolny disponují drážkami, do kterých jsou zasazeny pružné o-kroužky, které zamezí protočení obrobku. Hřídele byly přimontovány do rotačních roln, které byly následně vsunuty

do plochých ložisek. Tělo ložiska disponuje dvěma otvory. Jeden otvor slouží k připevnění k přírubě pomocí šroubového spoje, který zachová rotační pohyb otáčení. Druhý otvor slouží k rotačnímu pohybu ložiska, který je zaaretován pomocí šroubového spoje v kruhové výseči. Na zadní straně desky byl vytvořen ozubený převod, který byl připevněn ke zmíněným ložiskům, viz obr 25. Tento převod slouží ke změně vzdálenosti mezi rotačními rolny z důvodů proměnlivých koncových průměrů jednotlivých obrobků.



Obr. 25 Posuvná příruba s osazenými ozubenými koly a rotačními rolny.

K přírubě byly osazeny úchyty se zakomponovanými maticemi, do kterých byly následně našroubovány trapézové šrouby, viz obr 26.

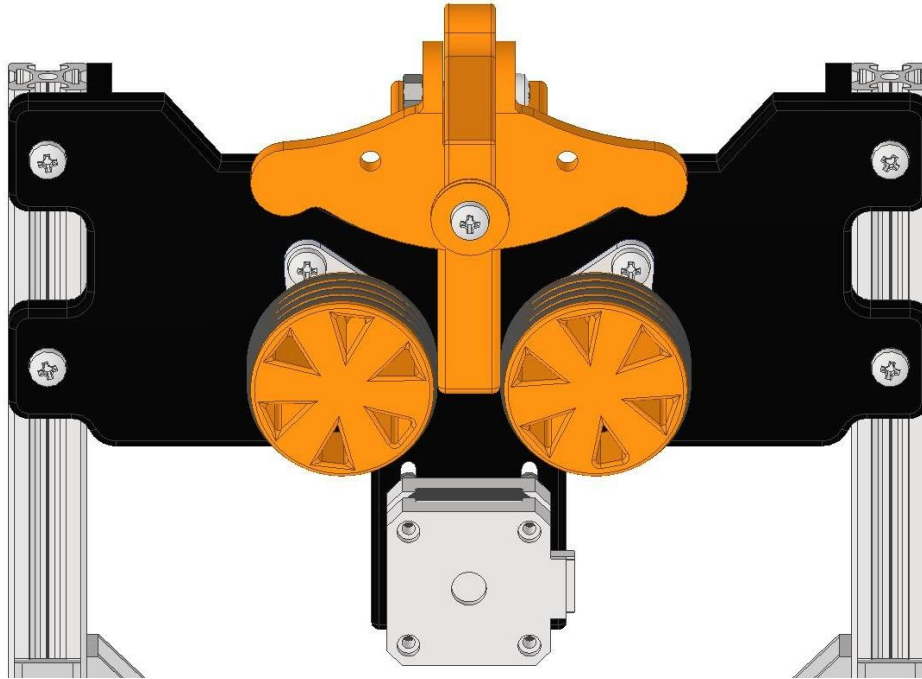


Obr. 26 Připevňená příruba k rámu.

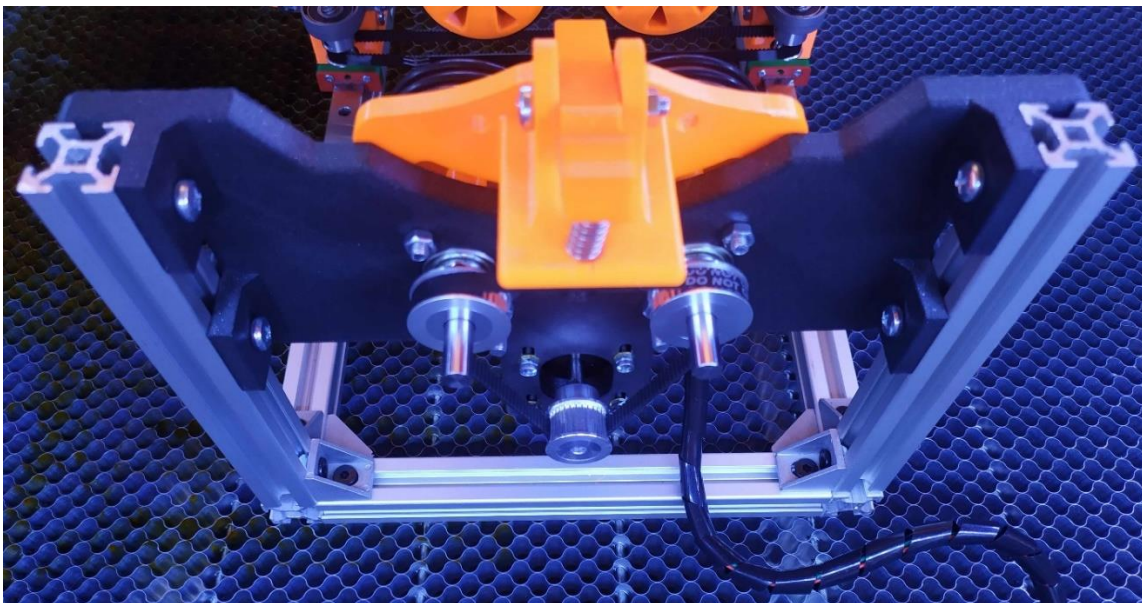
5.2.5 Pevná příruba

Pevná příruba vychází z konstrukčního návrhu pohyblivé příruby, ale místo řešení nastavitelné vzdálenosti mezi rotačními rolny, je zde pouze vlastní rotace jednotlivých rolen kolem vlastní

osy. Tento pohyb byl řešen pomocí řemenového převodu, který je iniciován krokovým motorem typu NEMA 17. Napínání řemenu bylo vyřešeno pomocí vytvořených drážek v přírubě pro krokový motor, viz obr 27 a 28. Do zadní části příruby byla nalisována kuličková ložiska. Na přidělaný doraz byla přimontována spona s kolečkem, která přitlačí vnitřní průměr obrobku k rotačním rolnám. Tento prvek zamezí proklouznutí obrobku.



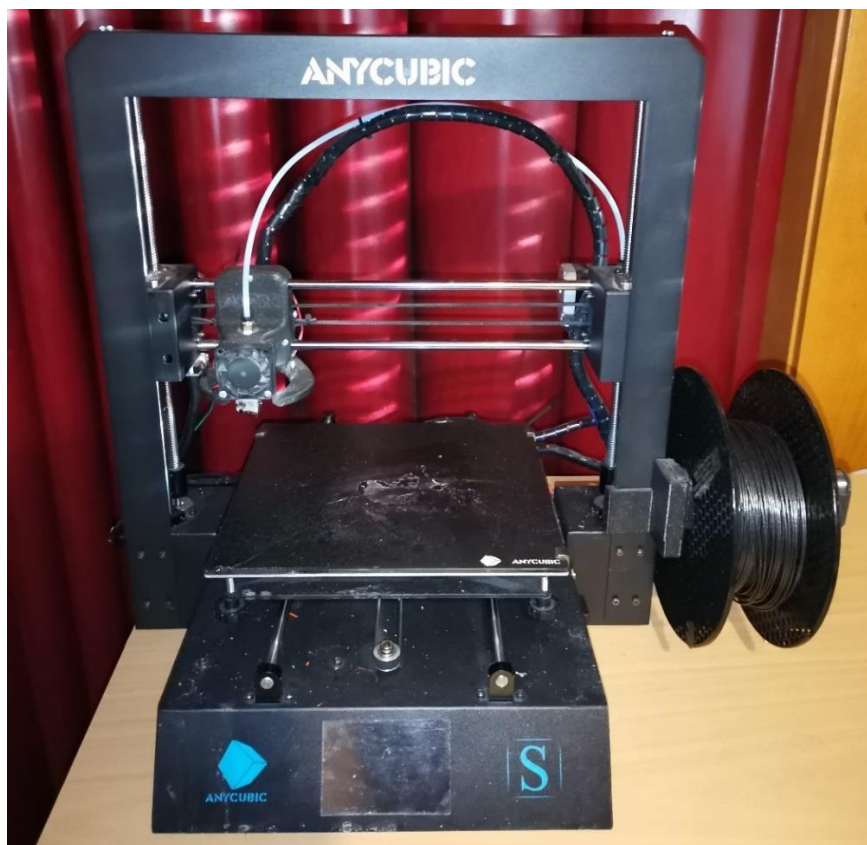
Obr. 27 Přední pohled pevné příruby.



Obr. 28 Zadní pohled pevné příruby.

5.3 Postup výroby navržených dílů pomocí FFF technologie

Pro výrobu jednotlivých dílů z důvodů nízkých nákladů a možnosti rychlého prototypování byla zvolena FFF technologie 3D tisku na tiskárně Anycubic I3 Mega S, viz obr 29. Na součásti byl zvolen materiál PETG z důvodu lepších mechanických vlastností, vyšší houževnatosti a teplotní odolnosti.

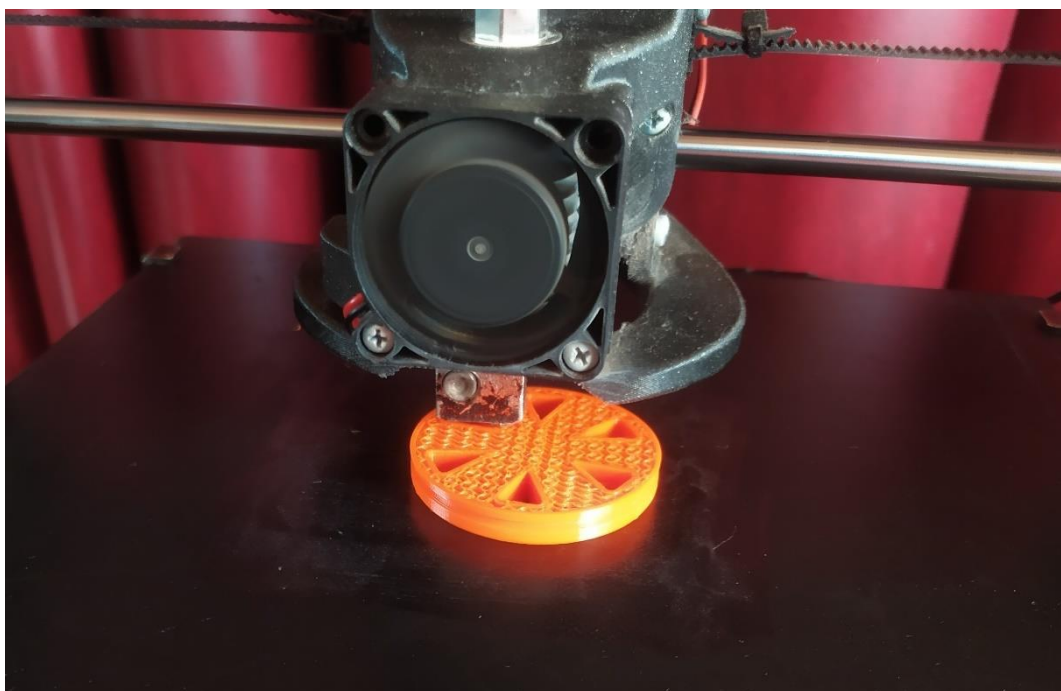


Obr. 29 3D tiskárna Anycubic I3 Mega S.

Dle výrobce filamentu byly nastaveny parametry 3D tisku, teplota extruderu 240 °C, podložky 90 °C. Výška tištěné vrstvy byla nastavena na 0,2 mm, z důvodu zachování kompromisu mezi rychlostí tisku a detailu. Výplň tištěných dílů s tvarem gyroid byla zvolena na 30 %, aby byla zachována požadovaná pevnost součástí. Zhotovené díly byly zbaveny otřepů a podpěr pomocí skalpelu a jako dokončovací proces bylo zvoleno broušení pomocí brusného papíru s nízkou hrubostí. Na obrázku 30 je zachycena 3D tiskárna při tištění dílce. V tabulce 3 jsou vypsány všechny tištěné dílce, čas tisku a jednotlivé hmotnosti.

Tab. 3 Přehled tištěných dílů pomocí 3D tisku

Název dílu	Počet [ks]	Čas [h]	Hmotnost [g]
Pevná příruba	1	9,7	114,48
Pohyblivá příruba	1	4,72	56,79
Doraz	2	5,25	56,05
Rotační rolna	4	12,17	94,76
Spona	1	1,13	10,57
Úchyt na ložisko	4	4	33,95
Úchyt na svěrku	2	5,33	61
Ozubený převod	1	4,5	47,42
Úchyt na profil	2	1,9	13,96
Kolečko na posuv	1	1,72	14,47
Úchyt na desku	2	3	32,26
Celkem:		53,42	535,71



Obr. 30 Zachycená 3D tiskárna při tištění rotační rolny.

5.4 Připojení rotační osy k CO₂ laserové řezače

Jak už bylo zmíněno v předchozích odstavcích rotační osa byla zapojeno místo osy Y za pomoci driveru, krokového motoru a zdroje.

KROKOVÝ MOTOR NEMA 17

Pro pohon rotační osy byl zvolen krokový motor s označením 17HS19-2004S1. Krokový motor Nema 17, viz obrázek 31, je bipolární typ s krokovým úhlem 1,8° a to s přesností 5 %. To znamená že motor má k dispozici 200 hardwarových kroků (HW), které je dále možné v kombinaci s driverem krokového motoru dělit na poloviny, čtvrtiny, osminy a další násobky. Takto rozdělený HW krok se nazývá softwarový krok (SW). SW krok zvyšuje polohovací přesnost daného motoru. Na každé fázi je odebráno 1,2 A při napětí 4 V. Díky tomu je udržován kroučící moment na hodnotě 0,31N·m. Krokový motor Nema 17 je často využíván v 3D tiskárnách, CNC strojích a laserových řezačkách.



Obr. 31 Motor Nema 17.

DRIVER PRO KROKOVÝ MOTOR

Driver pro bipolární krokový motor Nema 17 byl zvolen Driver DM542, který je zapojen do zdroje zařízení a také do řídicí jednotky. Tento driver byl také zvolen z důvodu vysoké kvality, programovatelnosti v mikro-krocích pomocí SW přepínačů, dále schopností zajistit tichý chod krokového motoru při zatížení. Díky tomuto zapojení je možné snadno ovládat rotační osu pomocí ovladače řídicí jednotky. Nastavení driveru je závislé na zvolení krokového motoru.

ŘÍDICÍ JEDNOTKA

Řídicí jednotky jsou určeny pro snazší manipulaci CO₂ laseru z důvodu přehledného panelu s displejem. Do těchto jednotek se zapojují drivery krokových motorů jejich zdroje a koncové mechanické spínače pro jednotlivé osy a zdroj laserové trubice. CO₂ laserová řezačka Goliáš, která je používána, disponuje řídicí jednotkou od firmy Cloudray Ruida RDC6445G.

Systém Ruida RDC6445G, který je znázorněn na obrázku 32, disponuje velkou škálou softwarových a hardwarových funkcí, jako jsou: řízení pohybu 4 os, velkokapacitní úložiště souborů, dvoukanálové rozhraní pro řízení výkonu laseru, ovladače USB s lepší kompatibilitou. Tento systém lze propojit s počítačem pomocí USB 2.0 nebo Ethernetovým kabelem. Režim komunikace je automaticky kontrolován systémem. Počítačové programy jako jsou AutoCAD nebo CorelDraw jsou podporovány tímto systémem.



Obr. 32 Řídicí jednotka od firmy Cloudray.

KABELOVÝ SYSTÉM

Konektivita je řešena pomocí kabelu s osazeným čtyř pinovým konektorem typu GX12. Kabel zajišťuje napájení jednotlivých vinutí, které je distribuováno signálem PWM z driveru do krokového motoru.

5.5 Softwarý pro vytváření grafiky a gravírovacího programu

Pro gravírování a řezání pomocí CO₂ laseru je potřeba nejprve vytvořit grafiku v softwaru CorelDraw, která je následně exportována do softwaru RDWorks, ve kterém jsou nastaveny parametry gravírování. Následně je vytvořen gravírovací program, který je přímo odeslán do laserové řezačky.

5.6 Nastavení rotační osy v RDWorks

Pro nastavení přesných parametrů pro otočení obrobku na rotační ose, které je zapotřebí vložit do softwaru RDWorks, existují dvě různé metody výpočtu, které lze použít. Pomocí tohoto nastavení se otočí obrobek o 360° zpátky do své počáteční polohy, toto také slouží k ověření správného nastavení parametrů rotace.

5.6.1 První metoda výpočtu počtu kroků pro otočení obrobku o 360°

První metoda vychází přímo z uživatelské příručky RDWorks. Tato metoda vychází z výpočtu počtu kroků potřebných na jednu otáčku (k), která je definována vztahem (5.1). Pro vypočítání neznámé bylo zapotřebí vynásobit mezi sebou převodový poměr (i_a), puls na otáčku (b) a poměr průměru (i_b).

$$k = i_a \cdot b \cdot i_b [-] \quad (5.1)$$

Převodový poměr byl určen dle vztahu (5.2). Jedná se tedy o poměr počtu zubů na řemenici na motoru (z_m) a počtu zubů na řemenici na rolně (z_r).

$$i_a = \frac{z_m}{z_r} = \frac{40}{30} = \underline{1,33} [-] \quad (5.2)$$

Celkový převodový poměr odpovídá hodnotě 1,33.

Další hodnotou, kterou bylo zapotřebí zjistit, byl počet pulsu na jednu otáčku rotoru. Tato hodnota je odvozena z tabulky na driveru krokového motoru, která uvádí závislost nastavení switch přepínačů na počtu softwarových kroků (SW) na jednu otáčku, viz obr 33. Počet SW kroků určuje délku obvodové dráhy řemenice krokového motoru a tím pádem i jemnost polohování. Odpovídá-li tedy obvod řemenice hodnotě např. 40 mm, bude tato dráha rozdělena při uvedeném nastavení na 6400 kroků. Jeden SW krok by pak představoval dráhu 0,00625 mm, tedy pro posun o inkrement 0,1 mm by bylo zapotřebí realizovat 16 kroků.

Pulse/rev Table					SW6	SW5	SW4	SW3	SW2	SW1
Pulse/rev	SW5	SW6	SW7	SW8						
400	off	on	on	on						
800	on	off	on	on						
1600	off	off	on	on						
3200	on	on	off	on						
6400	off	on	off	on						
12800	on	off	off	on						
25600	off	off	off	on						
1000	on	on	on	off						
2000	off	on	on	off						
4000	on	off	on	off						
5000	off	off	on	off						
8000	on	on	off	off						
10000	off	on	off	off						
20000	on	off	off	off						
25000	off	off	off	off						

Vdc: +20V ~ +50V

Obr. 33 Tabulka pro určení pulzu za otáčku.

Poslední neznámá se odvíjí od průměru obrobku (d_o) a průměru rotačních rolen (d_r). Poměrem těchto průměrů se získá zbylá konstanta i_b . Převodový poměr průměrů se vypočítá dle vztahu (5.3). Průměr rotačních rolen byl naměřen 52 mm.

$$i_b = \frac{d_o}{d_r} [-] \quad (5.3)$$

Poslední neznámá i_b je závislá na průměru obrobku. Proto byla vytvořena excel tabulka, která slouží pro přehlednost a usnadnění výpočtu kroku na otáčku. Na obrázku 34 je znázorněna zmíněná tabulka. Pro demonstraci výpočtu byl vybrán obrobek a byl doplněn jeho vnější průměr.

Rotační osa					
Konstanty			Počet zubů na řemenici na motoru (z_m)	30	[-]
Převodový poměr (i_a)	1,333333333	[-]	Počet zubů na řemenici na rotační rolně (z_r)	40	[-]
Pulz za otáčku (b)	6400	[-]	Průměr rotační rolny (d_r)	52	[mm]
Proměnlivé veličiny					
Průměr obrobku (d_o)	74	[mm]			
Poměr průměrů (i_b)	1,423076923	[-]			
Kroky na otáčku (k)	12143,58974	[-]			

Obr. 34 Vytvořená excel tabulka pro snazší výpočet kroku na otáčku.

Pro vypočítání hodnot bylo zapotřebí doplnit hodnoty do softwaru RDWorks. Nejprve bylo třeba kliknout na záložku uživatel, která je na pravé straně programu RDWorks. Poté byla zakliknuta odrážka další, kde bylo povoleno otáčení. Zde byly vepsány hodnoty počtu kroků na otáčku a vnější průměr obrobku.

5.6.2 Druhá metoda výpočtu počtu kroků pro otočení obrobku o 360 °

U druhé metody jsou pouze nastaveny následující hodnoty: kroky na otáčku a průměr rotační rolny. Tyto hodnoty byly zapsány a uloženy do softwaru RDWorks z důvodu neměnnosti těchto veličin. Poslední hodnotou, kterou požaduje program, je obvod obrobku. Tato hodnota byla vypočítána a následně zadána do zmíněného programu. Obvod obrobku určuje vzdálenost (ohniskovou vzdálenost) mezi laserem a obrobkem.

5.6.3 Porovnání obou metod

Při odzkoušení obou metod na stejném obrobku, který měl velké rozdíly vnějších koncových průměrů, docházelo u druhé metody k nepřesnostem při gravírování. U první metody nebyly nalezeny nedostatky na povrchu obrobku. Důvodem této nepřesnosti je, že první metoda není pouze závislá na průměru obrobku, ale je závislá na více parametrech a tato nepřesnost se ve výsledku zmenší. Naopak při obrobku s konstantním průměrem byly obě metody stejně přesné.

5.7 Experimentální ověření navržených postupů rotační osy na CO₂ laserové řezačce

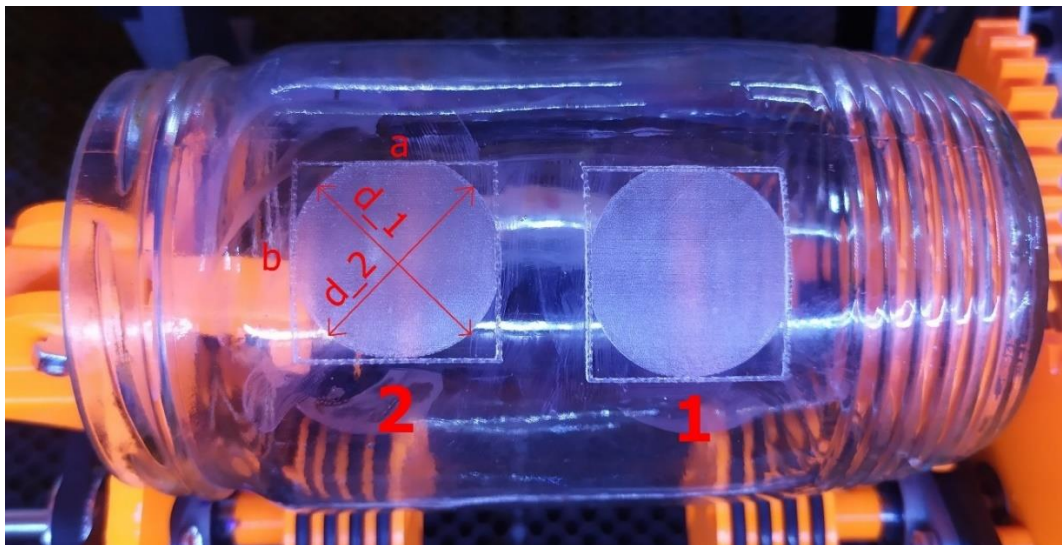
Rotační osa byla odladěna na CO₂ laserové řezačce s názvem Goliáš. Odladění bylo provedeno pomocí dvou různých rotačních obrobků, které mimo jiné dokazují univerzálnost rotační osy. První obrobek pro odzkoušení byl s konstantním vnějším průměrem a druhý obrobek byl s proměnlivými vnějšími průměry. Pro odzkoušení gravírování byla zvolena kontura, která se skládala ze čtverce (30×30 mm) s vepsaným kruhem. Vepsaný kruh byl pálen a hrany čtverce vygravírovány. Výkon laseru byl nastaven u čtverce na 40 % a u vepsané kružnice na 10 %. Maximální výkon laserové řezačky je 90 W. Rychlost řezání byla nastavena u gravírování kružnice na 300 mm · s⁻¹ a u čtverce na 10 mm · s⁻¹.

5.7.1 Varianta 1 - Obrobek s konstantním vnějším průměrem

Nejprve byl změřen průměr obrobku. Tato hodnota byla následně dopsána do excel tabulky, která byla zmíněna v kapitole 5.6.1. Pomocí tabulky byla dopočtena hodnota počtu kroků potřebných na jednu otáčku, která byla vepsána do softwaru RDWorks s hodnotou průměru obrobku. Výsledné gravírování bylo velmi nepřesné, a to především v rotační ose x, kde se délka strany čtverce zvětšila o 3,6 mm, viz tabulka 4. Hodnoty byly měřeny pomocí digitálního posuvného měřidla. Naopak v ose X byla délka strany čtverce zachována. Kvůli špatnému přepočtu byla vygravírována laserem místo kružnice elipsa. Pro vyřešení deformace vygravírovaného obrazce byl výpočet otestován, jestli se obrobek otočí o 360 ° zpět do své původní polohy. Po konci testu byl obrobek vychýlen ze své počáteční polohy. Obrobek byl přeměřen, z důvodu možné chyby měření. Celý proces, který předcházela před gravírováním při prvním pokusu, byl zopakován. Výsledný vygravírovaný obrazec byl zdeformovaný v řádu setin milimetrů, viz obr 35.

Tab. 4 Naměřené hodnoty prvního testovaného obrobku při odladění rotační osy

Test	1	2
a [mm]	30,08	30,05
b [mm]	33,62	30,09
d_1 [mm]	30,03	30,05
d_2 [mm]	31,42	31,53



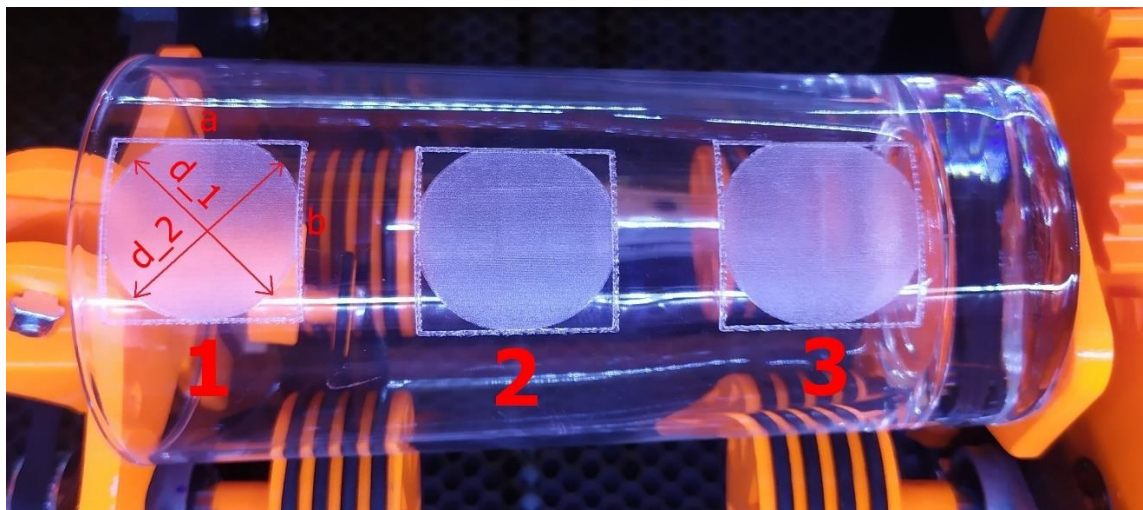
Obr. 35 Obrobek s konstantním průměrem po gravírování.

5.7.2 Varianta 2 - Obrobek s proměnlivým vnějším průměrem

Pro druhý test rotační osy byl vybrán obrobek s proměnlivým vnějším průměrem. Do obrobku byly vygravírovány celkem tři obrazce po celé jeho výšce. Z důvodu proměnlivosti průměru musel být průměr obrobku (d) změřen na třikrát, viz tabulka 5. Pokud by se pracovalo s největším průměrem obrobku, pak by gravírování bylo v jiných místech obrobku nekvalitní. Proto se vždy musel naměřit střední průměr, kde bude laser gravírovat. Na obrázku 36 je vyobrazen vygravírovaný obrobek.

Tab. 5 Naměřené hodnoty druhého testovaného obrobku při odladění rotační osy

Test	1	2	3
a [mm]	30,03	29,95	29,94
b [mm]	29,95	29,98	30,02
d_1 [mm]	29,94	30,05	30,08
d_2 [mm]	29,95	29,97	30,01
d [mm]	72,80	68,90	63,90



Obr. 36 Obrobek s proměnlivým průměrem po gravírování.

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této části práce budou zhodnoceny celkové pořizovací náklady navržené rotační osy, ze kterých bude stanovena prodejní cena. V první části bude finanční vyhodnocení, které byly potřebné na zakoupení jednotlivých komponent pro osu. Ve druhé části této kapitoly bude vyjádřen celkový čas, který zahrnuje návrh konstrukce, sestavení a následné odladění. Na konci kapitoly bude vypočítána případná návratnost počátečních investic.

6.1 Náklady na potřebné díly pro rotační osu

Pro přehlednost byla vytvořena tabulka 6. V levém sloupci byly vypsány potřebné komponenty. V pravém sloupci tabulky byla poznamenána pořizovací cena jednotlivých dílů. Celková pořizovací cena (N_k) činí 4 895 Kč. Z tabulky vyplývá, že největší část celkové pořizovací hodnoty byla vynaložena na lineární vedení.

Tab. 6 Potřebné díly pro rotační osu

Název produktu	Pořizovací cena [Kč]
Šroubové spoje	265
Řemenové převody	420
Ložiska	336
Lineární vedení	1344
Vertikální svěrky	86
Krokový motor	600
Kabeláž	100
Filament	375
Profily	960
O-kroužky	69
Trapézový šroub	250
Hřídel	90
Celkem:	4895

6.2 Náklady na konstruktéra

Tabulka 7 slouží pro snazší výpočet potřebných hodin pro navrhnutí a zkonstruování rotační osy. Celkový čas, který stráví konstruktér vytvořením prototypu (t_p), činí 97 hodin. Tento výpočet vychází ze součtu všech potřebných operací, které se nacházejí v tabulce.

Tab. 7 Potřebné operace pro navrhnutí a zkonstruování rotační osy

Druh práce	Čas [h]
Průzkum trhu	6
Průzkum trhu s díly	4
Konstrukční návrh	80
Sestavení	4
Odladění	3
Čas pro sestavení prototypu:	97

Dle Českého statistického úřadu byla převzata průměrná měsíční hrubá mzda na konstruktéra k roku 2022, která činí 41 287 Kč. Po podělení této částky s hodnotou 168, která reprezentuje počet odpracovaných hodin za měsíc, se získá mzda konstruktéra na hodinu (M_k). Výsledná hodinová sazba po zaokrouhlení vychází na 246 Kč.

Dle vztahu (6.1) byla vypočítána částka pro zaplacení konstruktéra při výrobě prototypu.

$$N_A = t_p \cdot M_k = 97 \cdot 246 = \underline{23\,862\text{ Kč}} \quad (6.1)$$

Výsledná částka se vyšplhala na 23 862 Kč. Po sečtení s pořizovací cenou komponent, tak vychází finální částka ($N_{Acelkem}$) na 28 757 Kč.

Při kusové výrobě nebyl uvažován čas konstruktéra z důvodu prodeje rotační osy jako stavebnice.

6.3 Návratnost investice

POŘIZOVACÍ CENA

Jak už bylo zmíněno v předešlém odstavci, rotační osa se plánuje prodávat stavebnicovou formou, proto výsledná částka ($N_{Bcelkem}$) je rovna hodnotě N_k , dle vztahu (6.2).

$$N_{Bcelkem} = N_k = 4\,895 = \underline{4\,895\text{ Kč}} \quad (6.2)$$

Výsledná hodnota navržené rotační osy činí 4 895 Kč.

PRODEJNÍ CENA

Pro výpočet prodejní ceny bylo využito vztahu (6.3), kde $N_{Bcelkem}$ je celková cena vynaložena na sestavení rotační osy a m je marže, která je vyčíslena na hodnotu 30 %.

$$P = \frac{N_{Bcelkem}}{1 - \frac{m}{100}} = \frac{4\,895}{1 - \frac{30}{100}} = \underline{7\,000\text{ Kč}} \quad (6.3)$$

Prodejní cena byla vypočítána na hodnotu 7 000 Kč.

NÁVRATNOST

Pro výpočet návratnosti bylo nejprve zapotřebí odečíst hodnoty P a $N_{Bcelkem}$, dle vztahu (6.4).

$$N_{výdělek} = P - N_{Bcelkem} = 7\,000 - 4\,895 = \underline{2\,105\text{ Kč}} \quad (6.4)$$

Za každý prodaný kus se získá 2 105 Kč. Dle vztahu (6.5) je vypočítán počet kusů (K), od kterých se stává výroba rentabilní.

$$K = \frac{N_{Acelkem}}{N_{výdělek}} = \frac{28\,757}{2\,105} = \underline{14\text{ kusů}} \quad (6.5)$$

Pro získání počáteční investice by bylo potřeba sestavit a prodat 14 kusů rotačních os. Při jednosměnném osmihodinovém denním provozu by se tato investice vrátila za 12,25 dní.

Do kalkulace nákladů nebyly zahrnuty všechny vstupní položky, jako jsou například: režijní náklady na energie, teplo a další spotřební materiál. S ohledem na tvorbu zjednodušené kalkulace by se dalo očekávat, že hodnota návratnosti investice do návrhu by narostla na 1,5násobek kalkulované doby. I tento výsledek by však předpokládal značný potenciál pro komerční využití daného řešení například formou StartUpu. Nemohlo by se však v tomto případě jednat pouze o nabídku tohoto jediného produktu s ohledem na velikost uvažovaného trhu, avšak v rámci uvažovaného startupu by bylo možné dále zahrnout CO₂ laserovou řezačku Goliáš.

ZÁVĚR

Inovovaná rotační osa splňuje všechny požadavky, které byly vytipovány v tabulce 1. Oproti konstrukčnímu řešení osy č. 3, která z porovnání vychází jako nejvíce univerzální, inovované řešení disponuje dorazy a nastavitelností šířky upnutí. Nové konstrukční řešení umožňuje gravírovat všechny polotovary vyspecifikovány v tabulce 2. Z hlediska univerzálnosti použití pro různé gravírované polotovary se inovované řešení jeví jako konkurenceschopnější.

Při experimentálním ověření rozměrových parametrů výsledného obrazu byl u varianty 1 (obrobek s konstantním průměrem) výsledný testovací obrazec vygravírován s odchylkou 0,3 %. U varianty 2 (obrobek s proměnlivým průměrem) odchylka vygravírovaného obrazce odpovídala odchylce 0,25 %. Odchylka souvisela s přesností měření výchozího průměru polotovaru.

Při sestavování a následném testování rotační osy byly vytipovány jednotlivé komponenty, které mají potenciál pro další optimalizaci. Jednou z uvažovaných možných úprav je redukce rotačních rolen. Zde je potenciál pro zkrácení výrobních časů a také k úspoře materiálu. Dále byly odhaleny funkční nedostatky, kdy při vyšších posuvech docházelo k odskakování obrobku. Během testování nebyla příčina odhalena. Pravděpodobnou příčinou, pak může být chyba vzniklá při montáži, kvůli nedodržení sousosti pevné a volné přírubové desky, a také kvůli nedostatečné sousosti rolen. Další potenciál pro úsporu výrobních časů a materiálu spočívá v redukci velikosti a změně geometrie a optimalizací tvaru vytištěných dílů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. : il. ; 30 cm. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-7204-722-2.
3. Nekonenční technologie obrábění (NMO). In: *TechMagazín* [online]. Praha: TechMagazín, 2015 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/2332>
4. VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01108-9.
5. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (LASER CUTTING). In: *Lasery a Optika* [online]. Praha: Lasery a Optika, 2011 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
6. Laserové technologie. In: *DOCPLAYER* [online]. DOCPLAYER, 2013 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/17401536-Laserove-technologie.html>
7. Řezání CO2 laserem – Optický systém Bifocal. In: *Konstrukce* [online]. Ostrava: Konstrukce, 2005 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/rezani-co2-laserem-opticky-system-bifocal/>
8. Laserové technologie v praxi. In: *ANZDOC* [online]. Bad Aussee, Austria: ANZDOC, 2010 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://adoc.pub/laserove-technologie-v-praxi.html>
9. Princip CO2 laseru. In: *Leonardo technology* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
10. SERIÁL NA TÉMA LASERY - ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. In: *Lasery a Optika* [online]. Praha: Lasery a Optika, 2013 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
11. Fyzikální princip laseru. In: *IS MUNI* [online]. Brno: IS MUNI, 2007 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/F7050/4593943/Fyzikalni_princip_laseru-Skacelova_Dana.pdf
12. Laserové diody Část 1 - Princip funkce laserových diod. In: *Elektrorevue* [online]. Olomouc: Elektrorevue, 2001 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
13. Nekonenční metody obrábění – 4. díl. In: *MM Průmyslové Spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové Spektrum, 2008 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-4-dil>
14. Technologické lasery. In: *České svářečská společnost ANB* [online]. Praha: České svářečská společnost ANB, 2007 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
15. WITTEMAN, W. J. *The CO2 Laser*. Dot. 1. vyd. Berlin: Springer-Verlag, 1987. Springer series in optical sciences. ISBN 9783540176572.
16. VON ALLMEN, Martin a Andreas BLATTER. *Laser-beam interactions with materials: physical principles and applications*. 2nd updated ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995. Springer series in materials science. ISBN 3-540-59401-9.
17. LASER CUTTING PARAMETERS. In: *Bell Laser* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/30498769/185895.pdf>

18. *Effect of Process Parameters on Laser Cutting Process: A Review* [online]. 2016, [cit. 2022-04-11]. ISSN 2454-1362.
19. MARTÍNEZ-CONDE, Alejandro, Thomas KRENKE, Stephan FRYBORT a Ulrich MÜLLER. Review: Comparative analysis of CO2 laser and conventional sawing for cutting of lumber and wood-based materials. *Wood Science and Technology* [online]. 2017, **51**(4), 943-966 [cit. 2022-04-11]. ISSN 0043-7719. Dostupné z: doi:10.1007/s00226-017-0914-9
20. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. In: *MM Průmyslové Spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové Spektrum, 2012 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi>
21. SLOW AXIAL-FLOW LASER. In: *American Welding Society* [online]. Miami: American Welding Society [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://awo.aws.org/glossary/slow-axial-flow-laser/>
22. FAST AXIAL-FLOW LASERS. In: *American Welding Society* [online]. Miami: American Welding Society [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://awo.aws.org/glossary/fast-axial-flow-lasers/>
23. TRANSVERSE AXIAL-FLOW LASERS. In: *American Welding Society* [online]. Miami: American Welding Society [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://awo.aws.org/glossary/transverse-axial-flow-lasers/>
24. Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser?. In: *MM Průmyslové Spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové Spektrum, 2007 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser>
25. Rozdělení laserů. In: *LASCAM* [online]. Praha: LASCAM, 2015 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
26. ZNAČENÍ A GRAVÍROVÁNÍ NEKOVOVÝCH MATERIÁLŮ. In: *Lasery a Optika* [online]. Praha: Lasery a Optika [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znaceni-89/znaceni-a-gravirovani-nekovovych-materialu-90>
27. Lasery pro značení/gravírování. In: *LASCAM* [online]. Praha: LASCAM, 2016 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/lasery-pro-znaceni/>
28. Jak laserem značit a gravírovat kovy a jaký laser použít?. In: *MEGABLOG* [online]. MEGABLOG, 2016 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/jak-laserem-znacet-a-gravirovat-kovy-a-jaky-laser-pouzit/>
29. Gravírování laserem. In: *TRUMPF* [online]. Praha: TRUMPF, 2022 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/laserove-oznacovani/gravirovani-laserem/
30. LASER CHARACTERISTICS BY MATERIAL. In: *Laserax* [online]. Quebec: Laserax [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.laserax.com/technical-support/knowledge-base/laser-characteristics-material>
31. How does laser engraving work?. In: *Trotec* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.troteclaser.com/en/learn-support/faqs/how-to-laser-engrave>
32. Metal Etching. In: *Boss Laser* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20140808045007/http://www.bosslaser.com/co2-laser-applications/metal-etching>

33. Rotační osa pro laserové plotry CO2 4060, 4 dráty, série motoru 42. In: *Pajtech* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://pajtech.cz/rotan-osa-pro-laserov-plotry-co2-4060-4-drty-srie-motoru-42-p-18983.html>
34. OMTech Rotary Axis Attachment for Laser Engraver Cutter (Upgraded 2020 Model), Barrel Rolling Cylinder Surface Rotation Platform for Laser Engraving Machine, 360 Degree Rotating Axis. In: *Amazon* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: https://www.amazon.com/dp/B09B3GDLNS?ref=vse_pfo_vdp
35. CO2 Laser Wheel Rotary Axis Router with Stepper Motor 2 Phase CNC Roller Rotation Axis Rotary Attachment Rotate Engraving for Cutting Machine. In: *Amazon* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Stepper-Rotation-Attachment-Engraving-Cutting/dp/B0872CSBXY?th=>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
b	puls na otáčku	[-]
D	průměr objektivu	[mm]
d	průměr paprsku	[mm]
f	ohnisková vzdálenost	[mm]
h	hloubka ostrosti	[mm]
i_a	převodový poměr mezi řemenicemi	[-]
i_b	převodový poměr průměrů	[-]
K	počet kusů	[ks]
M_k	mzda konstruktéra na hodinu	[Kč]
m	marže	[-]
N_A	částka pro zaplacení konstruktéra při výrobě prototypu osy	[Kč]
$N_{Acelkem}$	pořizovací cena osy a při výrobě prototypu	[Kč]
$N_{Bcelkem}$	pořizovací cena osy při sériové výrobě	[Kč]
N_k	pořizovací cena dílů	[Kč]
$N_{výdělek}$	výdělečná část za prodej jednoho kusu	[Kč]
P	prodejní cena osy při sériové výrobě	[Kč]
t_p	čas pro vytvoření prototypu	[h]

Zkratky

Označení	Legenda
3D	trojrozměrný
AWJ	obrábění hydroabrazivním paprskem
CM	chemické obrábění
CNC stroj	počítačem řízený obráběcí stroj
DC	stejnoseměrný proud
EBM	obrábění paprskem elektronů
ECM	elektrochemické obrábění
EDM	elektroerozivní obrábění
FFF	fused filament fabrication
HW	hardwarový krok
Laser	light amplification by simulated of radiation
LBM	obrábění paprskem laseru
NMO	nekonvenční metody obrábění
PBM	obrábění paprskem plazmy
PETG	polyethylene terephthalate glycol
PWM	Pulse width modulation
RF	radiofrekvenční energie
SW	softwarový krok
USB	univerzální sériová sběrnice
USM	ultrazvukové obrábění
WJM	obrábění paprskem vody