



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NÁVRH A REALIZACE CO<sub>2</sub> LASERU S VÝKONEM DO 100W

DESIGN AND REALIZATION OF CO<sub>2</sub> LASER WITH POWER UP TO 100W

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Šrenk

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Slaný, Ph.D.

BRNO 2021

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Jakub Šrenk</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Martin Slaný, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

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 diplomové práce:

## **Návrh a realizace CO2 Laseru s výkonem do 100W**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce je zaměřena na vytvoření konstrukčního návrhu a výrobu CO2 Laseru s výkonem do 100W, který bude primárně určen pro tvarové řezání a gravírování organických materiálu a materiálu PMMA. Návrh bude vytvořen s podporou CAD/CAM systému. V rámci řešení zvoleného tématu se předpokládá návrh vhodného konstrukčního řešení zohledňující vstupní požadavky kladené na finální stroj. Dále bude práce řešit vhodnost použití vybraných komponent pro zvolenou technologii. Sestavený CO2 laser bude podroben testování, v rámci kterého bude stanovena přesnost stroje a dále bude vytvořena databáze řezných podmínek pro zvolené materiály.

### **Cíle diplomové práce:**

- Charakteristika problematiky laserového řezání a gravírování.
- Definice parametrů uvažovaného stroje.
- Volba komponent pro sestavení technologie CO2 Laseru.
- Konstrukční návrh CO2 Laseru.
- Výroba komponent k sestavení CO2 laseru s využitím systémů CAD a CAM.
- Realizace stavby stroje.
- Realizace testovacího provozu a odladění technologie a stroje.
- Ekonomické hodnocení návrhu a návratnost vstupních investic.

### **Seznam doporučené literatury:**

BENKO, B., FODEREK, P., KOSEČEK, M., BIELAK, R. I. Laserové technologie. 1. vyd. Bratislava, Vydavatelství STU, 2000, edice 4859. ISBN 80-227-1425-9.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení. 1. vyd. Zeross, Ostrava, 2001. 395s. ISBN 80- 85771-81-0.

FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástrojů. VŠ skriptum. Brno: CERM, 2006. 230 s. ISBN 80-214-2374-9.

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-2-4-4025-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na problematiku malých CO<sub>2</sub> laserů a jejich možného využití pro komerční výrobu. V první části práce jsou popsána dostupná zařízení na trhu a hodnocení jejich parametrů. V praktické části jsou specifikované parametry, které plynou z potencionálního využití technologie. Na základě těchto parametrů je zpracován návrh stroje a kompletní konstrukční řešení. Experimentální část se dále věnuje návrhu konstrukčních komponent, řídicího systému, elektrotechnických systémů a obecně komplexnímu technicko-technologickému řešení zařízení, včetně ekonomického hodnocení návrhu. Součástí práce je dále samotná stavba stroje včetně oživení, nastavení a odladění pro uvažovanou výrobu. Realizovaný stroj byl podroben testování, aby byla zajištěna požadovaná kvalita výroby.

### Klíčová slova

nekonvenční technologie obrábění, CO<sub>2</sub> laser, gravírování, řezání, CAD/CAM systém

## ABSTRACT

This work is focused on the problematics of small CO<sub>2</sub> lasers and their possible use for commercial production. The first part describes devices available on the market and evaluation of their parameters. The practical part specifies the parameters that arise from the potential use of technology. Based on these parameters, design of the machine and its complete mechanical design are elaborated. Furthermore, the experimental part deals with the design of structural components, control system, electrical systems and in general a complex technical-technological solution of the equipment, including economic evaluation of the design. Part of the work is also the construction of the machine itself, including activation, adjustment and debugging for the considered production. The constructed machine was subject to testing to ensure required quality of production.

### Key words

unconventional methods of machining, CO<sub>2</sub> laser, engraving, cutting, CAD/CAM system

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠRENK, Jakub. *Návrh a realizace CO<sub>2</sub> Laseru s výkonem do 100W* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129701>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný, Ph.D.

### **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh a realizace CO2 Laseru s výkonem do 100W** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Bc. Jakub Šrenk

## **PODĚKOVÁNÍ**

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Martinovi Slanému, Ph.D. za jeho trpělivost, ochotu a věnovaný čas při psaní diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a blízkým za to, že mě podporovali.

Bc. Jakub Šrenk

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ.....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	9
Cíle.....	9
TEORIE .....	10
1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ (NMO).....	10
2 OBRÁBĚNÍ PAPEREM LASERU - LBM .....	11
2.1 CO <sub>2</sub> laser a jeho využití.....	11
2.2 Rozdělení CO <sub>2</sub> laseru podle toku pracovního plynu .....	11
2.2.1 CO <sub>2</sub> lasery s pomalým podélným prouděním (Slow axial flow).....	11
2.2.2 CO <sub>2</sub> lasery s rychlým podélným prouděním (Fast axial flow) .....	12
2.2.3 CO <sub>2</sub> lasery s příčným prouděním (Transverse flow) .....	12
2.2.4 SLAB lasery.....	12
2.3 Fyzikální princip .....	13
2.3.1 Základní popis vlnové délky.....	13
2.3.2 Absorpce, spontánní a stimulovaná emise .....	13
2.3.3 Vznik laserového paprsku.....	14
2.4 Divergence paprsku.....	15
2.5 Modová struktura .....	15
2.6 Fokuse paprsku .....	16
2.7 Řezání CO <sub>2</sub> laseru a striace povrchu .....	16
2.8 Typy řezání.....	17
2.9 Závislost posuvu na výkonu laseru při řezání a vliv na průměrnou aritmetickou úchytku povrchu Ra .....	19
2.10 Vliv přehřívání trubice a paprsku na samotný proces řezání .....	19
2.11 Základní prvky CO <sub>2</sub> laseru .....	20
2.11.1 CO <sub>2</sub> laserové trubice .....	20
2.11.2 Elektrický zdroj laserové trubice .....	21
2.11.3 Optika CO <sub>2</sub> laseru .....	21
2.11.4 Chlazení CO <sub>2</sub> laseru.....	22
2.11.5 Asistenční plyn .....	23
2.12 Porovnání CO <sub>2</sub> s ostatními druhy laserových technologií.....	24
PRAKTICKÁ ČÁST .....	25

3	DEFINICE PARAMETRŮ UVAŽOVANÉHO STROJE .....	25
4	PRŮZKUM TRHU .....	26
4.1	HL-80W .....	26
4.2	BRM Budget .....	26
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ A REALIZACE.....	28
5.1	Optická cesta .....	28
5.1.1	LasEROVÁ trubice a uchycení .....	29
5.1.2	Zrcadla, fokusační čočka a montáž.....	30
5.2	Konstrukce .....	32
5.2.1	Hliníkové profily.....	32
5.2.2	Spojovací prvky .....	32
5.2.3	Rám.....	33
5.2.4	Poklop .....	34
5.2.5	Řídicí skříň.....	35
5.2.6	Krytování .....	36
5.3	Pracovní osy .....	37
5.3.1	Osa X .....	38
5.3.2	Osa Y .....	39
5.3.3	Osa Z.....	40
5.3.4	Pracovní stůl .....	41
5.4	Hardware .....	42
5.4.1	Zdroje energie .....	42
5.4.2	Řídicí jednotka.....	43
5.4.3	Drivery pro krokové motory .....	44
5.4.4	Krokové motory .....	44
5.4.5	Ovládací panel .....	45
5.4.6	Osvětlení .....	46
5.4.7	Kabelový systém.....	46
5.5	Software .....	47
5.5.1	RDWorksV8 .....	47
5.5.2	CorelDraw.....	48
5.6	Chlazení.....	48
5.7	Odsávání.....	49
5.8	Asistenční plyn.....	50
6	VÝROBA NAVRŽENÝCH DÍLŮ POMOCÍ FDM TECHNOLOGIE.....	51



7	VÝROBA NAVRŽENÝCH DÍLŮ POMOCÍ CO <sub>2</sub> LASERU .....	52
8	TESTOVÁNÍ A ODLADĚNÍ STROJE .....	53
8.1	Seřízení optické cesty .....	53
8.2	Testování optimální vzdálenosti laseru od obrobku.....	53
8.3	Testování závislosti řezné rychlosti na výkonu laseru při řezání.....	56
8.4	Testování striace povrchu v závislosti na nastavených řezných podmínkách .....	57
8.4.1	Test maximální řezivosti na umístění v závislosti na umístění ohniska .....	57
8.4.2	Test vlivu umístění ohniska na striaci povrchu .....	58
8.5	Testování rozměrové přesnosti a kolmosti při řezání .....	58
8.6	Ladění a testování přesnosti při gravírování .....	59
9	PŘEDSTAVENÍ STROJE - CO <sub>2</sub> LASER 80 w - GOLIÁŠ .....	61
10	BEZPEČNOST PRÁCE .....	65
10.1	Prostředí.....	65
10.2	Obsluha.....	65
11	EKONOMICKÉ HODNOCENÍ.....	66
11.1	Náklady na použité nástroje, stroje a měřidla .....	66
11.2	Náklady na potřebné díly, konstrukční materiál a asistenční prvky CO <sub>2</sub> laseru.....	67
11.3	Náklady na hodinovou sazbu konstruktéra.....	68
11.4	Celkové náklady na výrobu prototypového stroje.....	70
12	NÁVRATNOST INVESTICE.....	71
13	POROVNÁNÍ PROTOTYPOVÉ A MALOSÉRIOVÉ VÝROBY STROJE .....	72
14	SROVNÁNÍ PARAMETRŮ A EKONOMIKY.....	75
	DISKUSE.....	76
	ZÁVĚR .....	77
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	78
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	82
	SEZNAM PŘÍLOH.....	84

## ÚVOD

CO<sub>2</sub> lasery jsou řazeny mezi nekonvenční technologie. Pro obrábění CO<sub>2</sub> laserem je využívána usměrněná energie elektromagnetického záření. CO<sub>2</sub> lasery jsou stále řazeny mezi nejsilnější plynové lasery na trhu. Nejčastěji jsou lasery využívány k řezání, gravírování nebo svařování různých materiálů. Možnost obrábění požadovaných materiálů je dána výkonem laseru, proto je možno obrábět přírodní materiály, jako je například dřevo, ale také materiály kovové, jako je například ocel.

Tato práce je zaměřena na řešení problematiky nízkovýkonného CO<sub>2</sub> laseru a jeho stavbu. Důvodem je, že tento typ laserů začíná být rozšířený a velice žádaný mezi širokou veřejností. CO<sub>2</sub> lasery mají velký potenciál v reklamním průmyslu v kombinaci s rapid prototypingem. Jsou využívány například v kamenickém, truhlářském nebo sklářském průmyslu. Toto téma jsem si zvolil jednak proto, že na našem trhu je poměrně malá nabídka nízkorozpočtových strojů, ale i proto, že CO<sub>2</sub> lasery se využívají v rapid prototypingu, který se dostává stále víc do povědomí firem a společností.

V praktické části bude na základě návrhu požadovaných parametrů zpracována konstrukce CO<sub>2</sub> stroje, volba komponent pro stavbu, realizace stavby stroje se všemi potřebnými prvky, testování a odladění technologie, ale také ekonomické zhodnocení návrhu, malosériové výroby a návratnost vstupních investic.

### Cíle

- Definovat parametry zvoleného stroje.
- Zvolit vhodné komponenty pro sestavení CO<sub>2</sub> laseru.
- Navrhnout kompletní konstrukci.
- Vyrobit a navrhnout komponenty potřebné na stavbu s využitím CAD a CAM systémů.
- Sestavit stroj i s dalšími potřebnými systémy.
- Testovat a odladit kompletní stroj.
- Provést ekonomické zhodnocení celé stavby a hodnotit návratnost investice.
- Porovnání prototypové a malosériové výroby stroje.

## TEORIE

### 1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ (NMO)

Nekonvenční technologie obrábění je technologie, která nevyužívá klasické nástroje pro dělení materiálu. Při tomto typu obrábění nedochází ke klasickému odebrání materiálu a tvoření třísky pomocí řezného nástroje. Nekonvenční technologie obrábění využívá pro dělení materiálu fyzikální nebo chemický princip úběru materiálu. Pro obrábění je často využívána eroze materiálu, která je přírodním jevem. Ta je definována jako dělení materiálu pomocí mechanického působení pohybujících se okolních látek. Jako nástroj se používají trysky, drát nebo také elektroda. Tyto nástroje přenášejí a usměrňují energii, která je potřebná pro obrábění [1; 2; 3].

NMO technologie je nejčastěji využívána pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou například žárupevné oceli, kalené oceli, litiny, keramika nebo také kompozitní materiály. Díly vyráběné touto metodou jsou nejčastěji používány v leteckém nebo v kosmickém průmyslu. Pozitivní stránkou nekonvenčních technologií je možnost obrábět vysoce tvarově složité díly nebo obrobky velmi malých rozměrů. Můžeme například vytvářet hluboké díry od průměru 0,1 mm. Při obrábění je dosaženo přesnosti až 1  $\mu\text{m}$ . Pozitivem u nekonvenčních technologií obrábění je velmi malá tepelně ovlivněná oblast, která nemění mechanické vlastnosti materiálu v okolí řezu. NMO jsou již plně automatizovány a využívají CAD/ CAM systémy. Stroje pro nekonvenční technologie obrábění jsou řízeny pomocí počítačů, tzv. CNC obráběcích strojů. Jsou řízeny ve dvou nebo ve třech osách [1; 2; 3].

#### Rozdělení NMO [1]

- a) Dělení materiálu tepelným účinkem
  - Elektroerozivní obrábění (EDM – Elektro Discharge Machining)
  - Obrábění paprskem plazmy (PBM – Plasma Beam Machining)
  - Obrábění paprskem laseru (LBM – Laser Beam Machining)
  - Obrábění paprskem elektronů (EBM – Elektron Beam Machining)
- b) Dělení materiálu elektrochemickým účinkem
  - Elektrochemické obrábění (ECM – Elektro Chemical Machining)
  - Chemické obrábění (CM – Chemical Machining)
- c) Dělení materiálu mechanickým účinkem
  - Ultrazvukové obrábění (USM – Ultrasonic Machining)
  - Obrábění paprskem vody (WJM – Water Jet Machinig)
  - Obrábění hydroabrazivním paprskem (AWJ – Abrasive Waterjet Machinig)

## 2 OBRÁBĚNÍ PAPEREM LASERU - LBM

Anglické slovo *laser* je zkratka pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což ve volném překladu znamená zesilování světla pomocí stimulování emise záření. Princip laseru se dá zjednodušeně popsat jako urychlované elektrony, které se neudrží v klidu a uvolní svoji energii (světelnou). Ta se přemění v tepelnou energii, pomocí které je dělen materiál [1; 4].

Lasery spadají do nekonvenčních technologií obrábění a jsou využívány například v průmyslu zbrojním, zábavním, kosmetickém, strojírenském, reklamním a ve zdravotnictví. LBM slouží k dělení materiálu, svařování (spojování), gravírování a vrtání. Laser je využíván k povrchovým úpravám, například pro odstranění zoxidované vrstvy. Nejnovější využití laseru v průmyslové výrobě je u technologií reverzního inženýrství, přesněji v rapid prototypingu. 3D tiskárny typu Selective Laser Sintering (SLS) a Direct Metal Laser Sintering (DMLS) využívají laser pro spékání (tvorbu) jednotlivých vrstev. Přesněji je zde využíván CO<sub>2</sub> laser, který generuje teplo a tím taví přídatný (stavební) materiál [1; 2; 3; 5].

### 2.1 CO<sub>2</sub> laser a jeho využití

CO<sub>2</sub> laser patří mezi plynové lasery, které pracují v aktivním prostředí. To tvoří směs plynů skládajících se z oxidu uhličitého, dusíku a hélia. Tento druh laseru je využíván pro řezání, gravírování a svařování. Řezat či gravírovat lze přírodní materiály, jako je například kůže nebo dřevo, ale také tvrdé materiály, kterými jsou legované nebo nelegované oceli. Schopnost řezat materiály různé tvrdosti je dána výkonem laseru, který je udáván ve watttech. Tento druh laserů je také schopen svařovat materiály. Druh tohoto svařování je výhodný proto, že umožní přesné zaostření svazku do jednoho bodu [3; 5; 6; 7; 8].

Ve strojírenství jsou používány CO<sub>2</sub> lasery například pro řezání či gravírování. Tyto lasery mají výkon od desítek wattů do desítek tisíc wattů. Laser je schopný přeměnit velké množství světelné energie na energii tepelnou. Při řezání není nutné brát ohled na chemické a fyzikální vlastnosti obrobku, protože na průběh řezání nemají vliv. Řezání pomocí CO<sub>2</sub> laseru je výhodné z důvodů nízké tepelně ovlivněné oblasti. Tento typ řezání je velmi přesný. Přesnost je od 0,05 do 0,1 mm na jeden metr délky řezu. Při řezu dochází i k velmi nízké průměrné aritmetické úchylce povrchu Ra, která nabývá hodnot až Ra = 1,6. Další výhodou CO<sub>2</sub> laseru je vysoká rychlost řezání, která dosahuje až desítek metrů za minutu. Tloušťka řezaných materiálů je závislá na tvrdosti obráběného materiálu. Obrobek musí mít konstantní tloušťku materiálu, protože je nutné zaostření rezní hlavičky do polohy, kdy je laser schopný vysílat fotony do jednoho bodu. Tento svazek fotonů je vysílán do místa řezu. Řezací hlavička je nejčastěji umístěna ve vzdálenosti z závislosti na ohniskové vzdálenosti od obrobku, kdy je laser schopen řezat. Tato vzdálenost je kontrolována pomocí čidla, aby bylo dosaženo ideální vzdálenosti mezi obrobkem a tryskou [2; 7].

### 2.2 Rozdělení CO<sub>2</sub> laseru podle toku pracovního plynu

CO<sub>2</sub> lasery jsou děleny podle toku pracovního plynu. Jsou děleny na CO<sub>2</sub> lasery s pomalým prouděním, s rychlým prouděním, s příčným prouděním a SLAB lasery.

#### 2.2.1 CO<sub>2</sub> lasery s pomalým podélným prouděním (Slow axial flow)

Slow axial flow je nejstarším typem CO<sub>2</sub> laserů. Aktivní plyn proudí pomalu rezonátorem. Energie je přiváděna výbojem ze stejnosměrného nebo střídavého napětí. Výboj postupuje shodným směrem s osou rezonátoru a svazkem výstupního záření. Tyto

lasery dosahují výkonu 50 W na jeden metr rezonátoru. Výkon trubice na metr je limitován chlazením [9; 10].

### 2.2.2 CO<sub>2</sub> lasery s rychlým podélným prouděním (Fast axial flow)

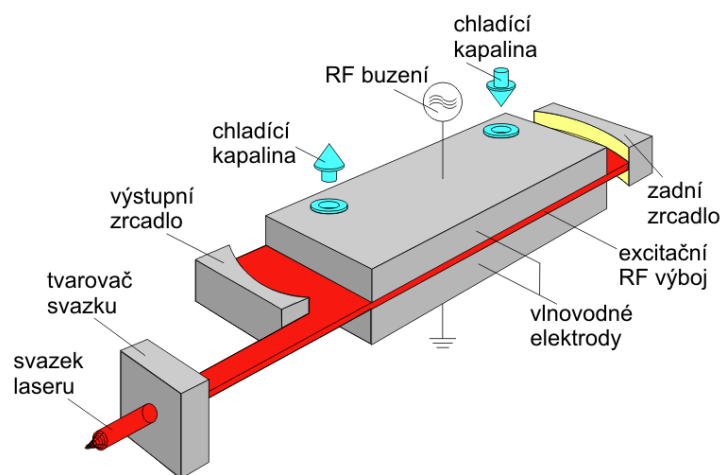
Fast axial flow dosahují výkonů 500 až 1 000 W na jeden metr rezonátoru. Plyn je urychlován vzduchovou pumpou. Chlazení plynu je zajišťováno tepelným výměníkem. Struktura svazku je stálá, ale často dochází k rychlým fluktuacím modu, což způsobuje méně kvalitní strukturu řezu. Energie pro vybuzení výboje je získávána ze zdrojů stejnosměrného a střídavého napětí. V poslední době se objevily excitované lasery, které využívají právě střídavé napětí. Díky tomuto typu napájení je zlepšena stabilita paprsku laseru. Tyto lasery jsou využívány nejčastěji pro řezání [9; 11].

### 2.2.3 CO<sub>2</sub> lasery s příčným prouděním (Transverse flow)

Transverse flow je unikátní tím, že laserový svazek proudí ve třech různých směrech. Konstrukce tohoto typu laserů je velice kompaktní. Laser dosahuje výkonů od 1 do 20 kW. Nejčastěji jsou využívány pro svařování, tepelné zpracování a málokdy pro řezání. Energie pro laser je generována pomocí stejnosměrného zdroje. Díky tomuto typu napájení je lépe říditelný [9; 12].

### 2.2.4 SLAB lasery

SLAB lasery jsou kompaktní lasery s vysokofrekvenčním buzením a velkoplošnými měděnými elektrodami. Zkratka SLAB označuje tvar výboje. Výboj je buzen velkými elektrodami, které jsou zároveň využívány ke chlazení. Tyto lasery jsou výkonnější než konvenční lasery. Schéma konstrukce rezonátoru je znázorněno na obrázku 1. [9; 13].



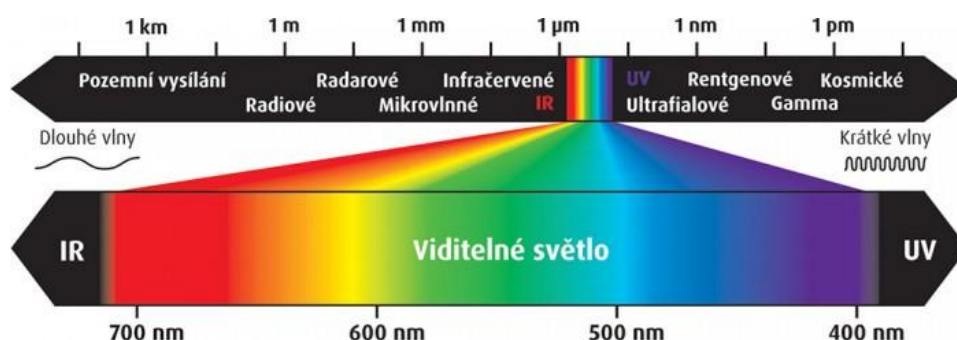
Obr. 1 Schéma SLAB laseru [7].

## 2.3 Fyzikální princip

Fyzikální princip CO<sub>2</sub> laseru je podrobně popsán pomocí kvantové fyziky. Z důvodu složitosti bude fyzikální princip zjednodušen, aby byl srozumitelný.

### 2.3.1 Základní popis vlnové délky

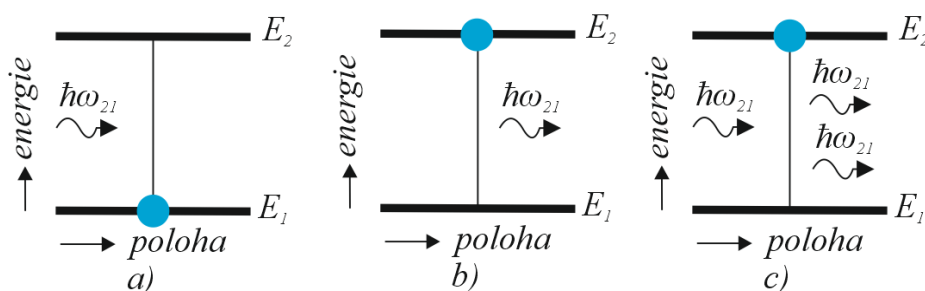
Základní vlastností, díky níž laser vzniká, je, že se s rostoucí energií elektromagnetického záření snižuje vlnová délka. Čím větší energii má vyzářený foton, tím menší je vlnová délka. Elektromagnetické záření je rozděleno vzestupně na rádiové záření, vlny mikrovlnné, infračervené záření, viditelné světlo, ultrafialové záření, rentgenové záření a gama paprsky (viz obr. 2). Podle vlnové délky je laser předurčen na danou aplikaci. Rozdílné vlnové délky jsou používány na svařování, řezání či gravírování [14; 15; 16; 17].



Obr. 2 Schéma elektromagnetického záření [17].

### 2.3.2 Absorpce, spontánní a stimulovaná emise

Absorpci, spontánní a stimulovanou emisi jsme schopni určit pomocí zákonů kvantové mechaniky. Tento jev existuje mezi atomy v plynném stavu. Ke vzniku emise dochází při uvolnění energie mezi atomy, která vznikla jejich pohybem mezi jednotlivými valenčními vrstvami, a tím dojde k vyzáření fotonů. K absorpci emise dochází, když se atom přesouvá z nižší valenční vrstvy do vyšší. Je tedy potřeba energii dodat, viz obr.3a). Naopak, když se atomy přesouvají z vyšší valenční vrstvy do nižší, dochází ke spontánní nebo stimulované emisi. U spontánní emise je atom přesunut z hladiny  $E_2$  do hladiny  $E_1$ . Při přesunu atomu je vyzářen foton s energií  $\hbar\omega_{21}$ , viz obr 3b). U stimulované emise je atom přesunut z hladiny  $E_2$  do hladiny  $E_1$ . Při přesunu atomu je vyzářen foton, nedojde k žádné absorpci energie, ale následně dojde ke vzniku dalšího fotonu o stejné energii, viz obr. 3c). U spontánní emise do soustavy vchází jeden foton namísto dvou fotonů [18; 19].

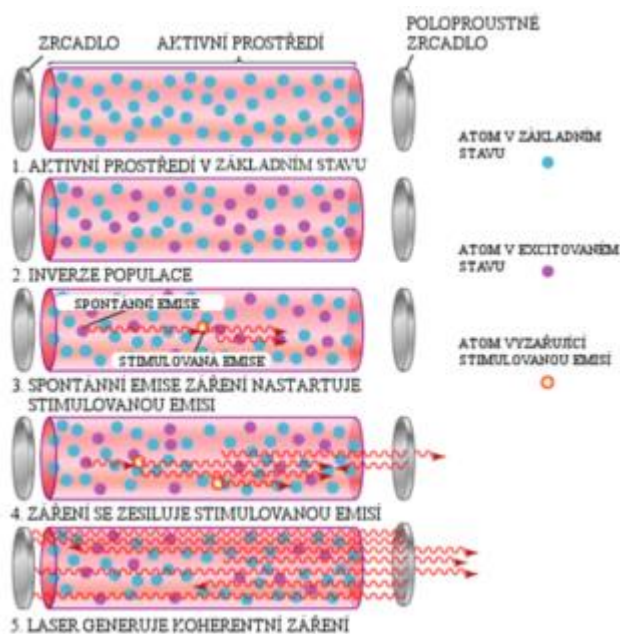


Legenda: vyzářená energie- $\hbar\omega_{21}$ , Základní stav- $E_1$ , Excitovaný stav- $E_2$

Obr. 3 a) absorpce emise, b) spontánní emise, c) stimulovaná emise.

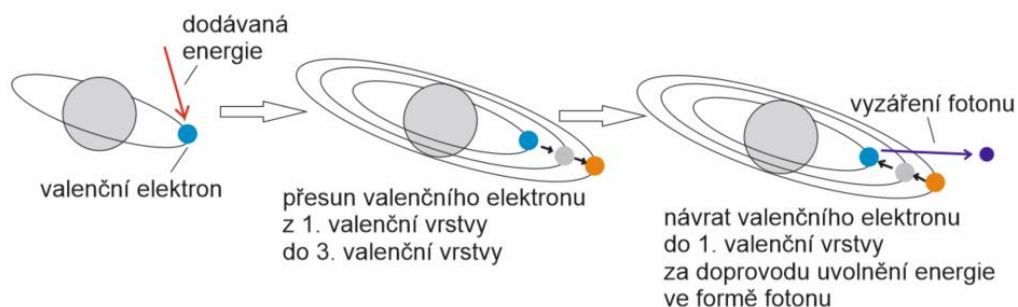
### 2.3.3 Vznik laserového paprsku

Laserové záření vzniká v aktivním prostředí optického rezonátoru, kde je využíváno stimulované emise, aby došlo k urychlení elektronů a následnému vyzáření fotonů. Aktivní prostředí obsahuje prvky, které umožňují elektronům přesouvat se mezi valenčními vrstvami. V aktivním prostředí je dosaženo stavu, kdy je podíl excitovaných elektronů (elektrony ve vyšší valenční vrstvě) vyšší než elektronů v 1. valenční vrstvě. K této reakci dochází díky energii získané z vysokonapěťového zdroje. Tato nahromaděná energie se uvolní za pomoci vystřelení fotonu. V trubici nastává jev, kterému se říká stimulovaná reakce. K té dojde, když je v aktivním prostředí foton schopen vyzářit více elektronů, než by zvládl absorbovat. V trubici (rezonátoru) jsou obsažena zrcadla, která zajišťují požadovaný směr vyzářených fotonů, jinak by docházelo k jejich vyzáření ve všech směrech. Rezonátor obsahuje dvě zrcadla, jedno nepropustné a jedno polopropustné. Ve své podstatě se fotony odráží v rezonátoru, dokud nemají požadovaný směr a energii, viz obr.4 [14; 15; 16; 19].



Obr. 4 Schéma vzniku laserového záření v rezonátoru [19].

Principem je urychlit elektron tak, aby se dostal z nižší valenční vrstvy (1.) do vyšší valenční vrstvy (3.). Touto reakcí elektron získá energii. Abychom ho udrželi na této úrovni, musíme použít budící plyn. Poté co se elektron přesune do 2. valenční vrstvy, uvolní svoji energii ve formě fotonu. Fotony jsou vystřelovány a řazeny k sobě. Je to řízená reakce, abychom byli schopni ovládat laser, viz obr. 5 [14; 15; 16; 19].



Obr. 5 Schéma přesunu elektronu mezi valenčními vrstvami.

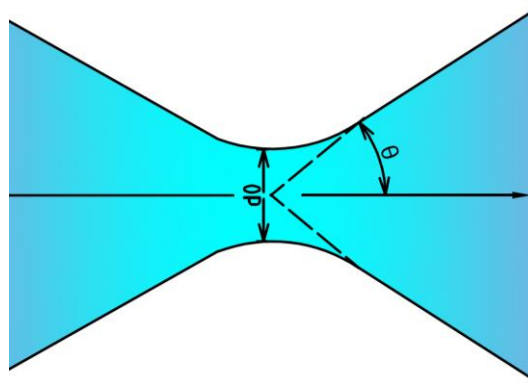
Intenzita, barevnost a viditelnost laseru je závislá na intenzitě energie a vlnové délce záření. Při jeho nejnižším výkonu je barva laseru červená. Ta odpovídá infračervenému záření. Při jeho největším výkonu je barva laseru fialová. Ta odpovídá ultrafialovému záření. Vlnová délka záření CO<sub>2</sub> laseru je 10,6 μm a účinností 20 %. [2; 14; 15; 16]

## 2.4 Divergence paprsku

Divergence neboli rozbíhavost se značí  $\Theta$ . Rozbíhavost je charakterizována jako polovina vrcholového úhlu kuželu paprsku. Parsek, který je neusměrněný a vychází skrz polopropustné zrcátko, má průměr  $2r_0 = d_0$  a rozbíhavost s vlnovou délkou  $\lambda_w$ , viz obr. 6. Divergence je dána vzorcem (2.1) [20].

Vzorec č. 2.1 [20]:

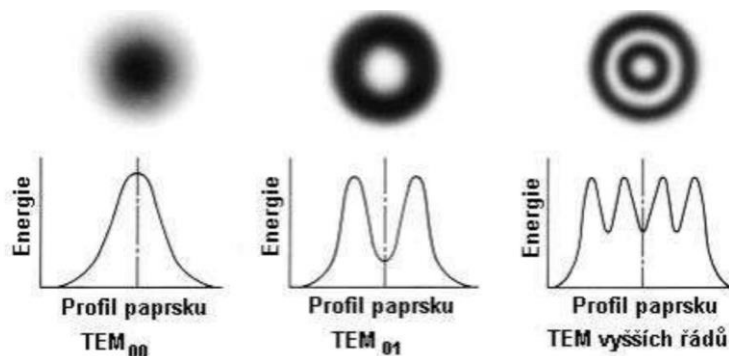
$$\Theta = \frac{\lambda_w}{\pi r_0} \quad (2.1)$$



Obr. 6 Schéma divergence paprsku.

## 2.5 Modová struktura

Modová struktura (TEM – *transverse electromagnetic model*) se liší konfigurací elektromagnetického záření. To je měřeno v rovině kolmé ke směru šíření paprsku. Měřením je zjištěna amplituda a fáze vlnění. Následně je určen mód, který je označen zkratkou TEM. Jednotlivé režimy (módy) jsou popsány kombinací Gaussovy křivky s Laguerrovým polynomem. Mód TEM<sub>00</sub> má největší hustotu energie ze všech módů. Na obrázku 7 jsou znázorněny tři základní módy [21; 22].



Obr. 7 Schéma základních módů TEM [22].

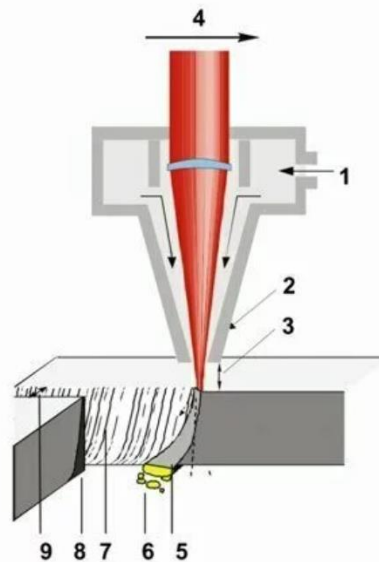


## 2.6 Fokusace paprsku

Pro fokusaci neboli ostření paprsku jsou používány konvexní čočky. Fotony jsou vystřelovány do konvexní čočky, kde jsou usměrněny a konvergovány do ohniska. Ve vzdálenosti větší, než je ohnisková vzdálenost, se paprsky rozcházejí. Je velice důležité vědět, kde se ohnisko nachází. Pro řezání a gravírování se používá různá ohnisková vzdálenost. Gravírování je prováděno ve vzdálenosti menší, než je ohnisková vzdálenost. Tolerance ostření je vysoce malá. Je to oblast, kde má paprsek nejmenší průměr. Ohnisková vzdálenost je závislá na hloubce ostroty. Čím bude kratší ohnisková vzdálenost, tím rychleji se bude paprsek sbíhat do ohniska a tím bude menší hloubka ostroty laseru. Čím větší je objektiv (čím větší je ohnisková vzdálenost objektivu), tím delší je ohnisková tolerance. Tento ukazatel je důležitý pro řezání silných materiálů. Při delší ohniskové vzdálenosti může docházet k tomu, že se materiál pouze zahřívá a nedochází k řezání [23; 24; 25].

## 2.7 Řezání CO<sub>2</sub> laseru a striace povrchu

Při řezání pomocí CO<sub>2</sub> laseru dochází k tepelnému dělení materiálu. K řezání dochází po dopadu svazku fotonů na materiál a následném prudkém ohřevu, natavení a odpaření obráběného materiálu. Z fyzikálního hlediska můžeme rozdělit řezání na tři typy: sublimační, tavné a oxidační řezání. Asistenční plyny slouží k odstraňování taveniny z místa řezu a k zamezení oxidace v místě řezu. Při dělení (řezání) pomocí CO<sub>2</sub> laseru dochází ke striaci povrchu ve štěrbině řezu, viz obr.8. Při odchodu materiálu z místa řezu ve formě taveniny a strusky dochází ke vzniku strií [26; 27].

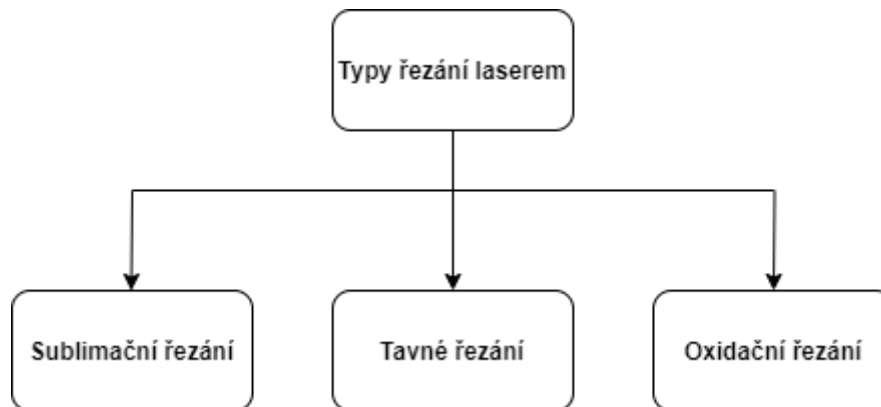


Legenda: 1-pomocný plyn, 2-tryska, 3-vzdálenost trysky, 4-posuv, 5-roztavený materiál, 6-struska, 7-drsnost, 8-tepelně ovlivněná oblast (TOO), 9-šířka řezu

Obr. 8 Princip laserového řezání [26].

## 2.8 Typy řezání

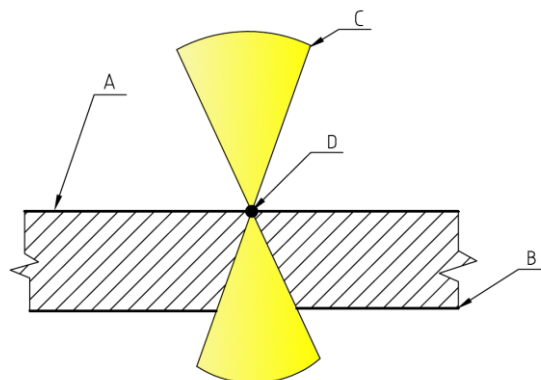
Řezání laserem lze rozdělit do několika druhů. Existují tři typy řezání: sublimační řezání, tavné řezání a oxidační řezání, viz obr. 9



Obr. 9 Typy řezání laserem

- **Sublimační řezání**

Při sublimačním řezání je materiál z místa řezu odpařován. Toho je dosaženo díky laserovému svazku, které ohřívá řezaný materiál na teplotu varu. Tato teplota umožní odpařování materiálu. Výpary vytvořené řezáním jsou odfukovány z okolí řezu mocí asistenčních plynů. Nejčastěji je používán dusík (N) nebo argon (Ar). Tyto plyny zamezí oxidaci materiálu v místě řezu. Sublimační řezání je využíváno na dělení tenkých plechů a minerálů. Ohnisko paprsku je ostřeno na horní stranu obráběného materiálu, viz obr. 10 [2; 7].



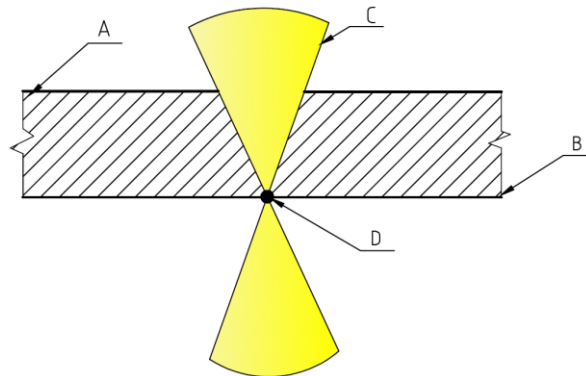
A-horní hrana, B-spodní hrana, C-paprsek, D-ohnisko

Obr. 10 Schéma sublimačního řezání.

- **Tavné řezání**

Tavné řezání je prováděno nižším řezným výkonem než u sublimačního řezání. Laserový svazek ohřívá materiál na teplotu tavení a proudem pomocného plynu, který je neaktivní, odvádí taveninu z řezné spáry. Plyn, který je používán pro odvod taveniny, je dusík (N<sub>2</sub>). Z důvodu nižší dosažené teploty při tavení, než u

sublimačního řezání je nutné, aby měl pracovní plyn vysoký tlak. Ten se pohybuje od 10 do 15 barů proto, aby se zabránilo ulpívání taveniny ve štěrbině řezu. Po provedení řezu je místo oddělení bez oxidů i bez zbarvení. Rychlost řezání je nízká. Důvodem je nízká tepelná energie, která při tomto typu řezání vzniká. Řezná rychlost roste lineárně s výkonem laseru a zároveň lineárně klesá s tloušťkou materiálu. Tavné řezání je využíváno na dělení legovaných ocelí, mědi, hliníku, niklu, keramiky, plexiskla nebo dřeva. Ohnisko paprsku je ostřeno na spodní stranu obráběného materiálu, viz obr. 11 [2; 7].

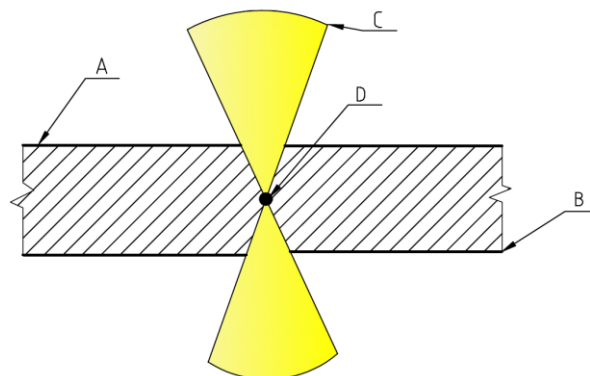


A-horní hrana, B-spodní hrana, C-paprsek, D-ohnisko

Obr. 11 Schéma tavného řezání.

- **Oxidační řezání**

Oxidační řezání je principově stejné jako tavné řezání. Jako asistenční plyn je používán kyslík ( $O_2$ ), který je vpuštěn do řezného prostoru pod nižším tlakem, který je 3 až 5 barů. Oxidační řezání lze nazývat také jako řezání plamenem. Řezaný materiál je zahříván na vysokou teplotu, která odpovídá zápalné teplotě obrobku. Dochází zde k exotermické reakci, jež dodává energii pro proces řezání. Při tomto typu řezání dochází k tepelnému ovlivnění okolí řezu. Materiál je oddělován pomocí taveniny a oxidů. Oxidační řezání je přibližně dvakrát rychlejší než řezání tavné. Zároveň umožňuje řezat materiály větších tloušťek. Oxidační řezání je určeno pro nelegovanou ocel a legovanou ocel. Ohnisko paprsku je ostřeno na střed tloušťky obráběného materiálu, viz obr. 12 [2; 7].

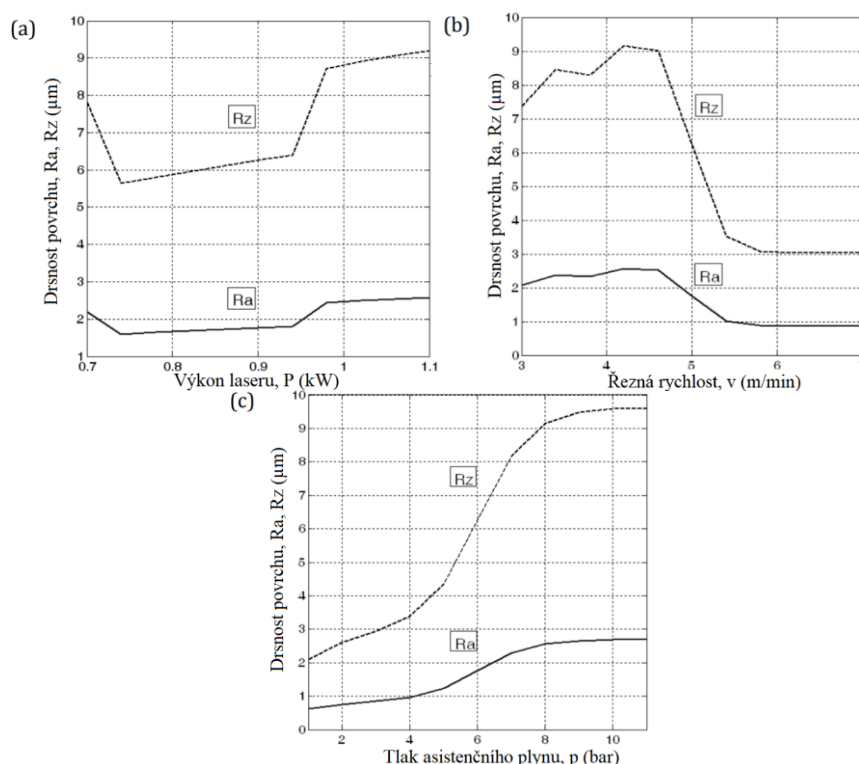


A-horní hrana, B-spodní hrana, C-paprsek, D-ohnisko

Obr. 12 Schéma oxidačního řezání.

## 2.9 Závislost posuvu na výkonu laseru při řezání a vliv na průměrnou aritmetickou úchylku povrchu Ra

Optimální nastavení parametrů řezání má vliv na kvalitu povrchu a celkové náklady. Kvalitu řezu lze předvídat podle vztahu drsnosti povrchu a řezných parametrů. Jako řezné parametry bereme rychlost posuvu, výkon laseru a tlak pomocného plynu. Podle výzkumu lze soudit, že kvalita řezu se zvyšuje s vyšší řeznou rychlostí. Výzkum ukázal, že řezná rychlost má zásadní vliv na drsnost povrchu Ra, zatímco výkon laseru má vliv zanedbatelný. Čím vyšší je tlak pomocného plynu, tím je vyšší drsnost povrchu. Jako zkušební materiál byla zvolena měkká ocel o tloušťce 2 mm. Na obrázku 13 jsou znázorněny tři grafy závislosti výkonu, řezné rychlosti a tlaku pomocného plynu na drsnosti povrchu a maximální úchylce povrchu Ra [28].



Obr. 13 a) Graf závislosti drsnosti povrchu na výkonu laseru, b) Graf závislosti drsnosti povrchu na řezné rychlosti, c) Graf závislosti drsnosti povrchu na tlaku pomocného plynu [28].

## 2.10 Vliv přehřívání trubice a paprsku na samotný proces řezání

Při přehřátí CO<sub>2</sub> laserové trubice dochází k nežádoucímu zkrácení její životnosti. Při nedostatečném chlazení může dojít také k přehřátí optiky. To způsobí vychýlení čočky a nakonec i její nevratné poškození. Tyto problémy mohou být způsobeny nízkovýkonným chladícím systémem nebo použitím špatného chladiva. Jako chladivo musí být použita deionizovaná voda. Pokud by byla použita pitná voda, došlo by k vápenatění, které způsobí následné přehřívání [29].

## 2.11 Základní prvky CO<sub>2</sub> laseru

### 2.11.1 CO<sub>2</sub> laserové trubice

CO<sub>2</sub> laserové trubice lze rozdělit podle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Dělíme na skleněné a kovové laserové trubice.

#### Skleněné trubice

Skleněné laserové trubice jsou vyplněny aktivním plynem, viz obr. 14. Toto aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů He + N<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>. Jejich poměr bývá nejčastěji 82 : 13, 5 : 4,5, ale může být namíchán i v jiném poměru. Tyto trubice mohou být dlouhé 0,5 – 2 m. Životnost výměnných trubic bývá přibližně 3 000 pracovních hodin a u trubic vyšší třídy až 10 000 pracovních hodin. Tyto trubice mají výkon od 0,5 do 200 kW. Aby se docílilo vysokých teplot při řezání, nachází se v trubici skleněná spirála, která slouží pro chlazení při řezání. Jako chladicí médium je nejčastěji používána destilovaná voda, používají se ale i speciální chladicí směsi určené na chlazení CO<sub>2</sub> laserů. Trubice je dále osazena katodou a anodou pro připojení elektrického zdroje na buzení laseru. Buzený neusměrněný paprsek laseru má průměr v jednotkách milimetrů. Na koncích trubice jsou zrcátka. Jeho odrazivost se blíží 100 % a druhé je polopropustné. Kombinace stejnosměrného (DC) vysokého napětí a vodního chlazení je velice nebezpečná a při vadě systému může být smrtící [2; 30; 31; 32].



Obr. 14 CO<sub>2</sub> skleněná laserová trubice Reci W1 [33].

#### Kovové trubice

Kovové laserové trubice jsou chlazeny vzduchem, viz obr. 15. Na jejich povrchu je vytvořeno žebrování, aby bylo docíleno lepšího odvodu tepla. Tomu také napomáhají ventilátory. V trubici je komora, která je plněna aktivním plynem. Ten je buzen pomocí radiofrekvenční energie (RF), což je hlavní rozdíl oproti buzení skleněné laserové trubice. Buzený neusměrněný paprsek laseru má průměr v desetinách milimetrů. Kovové trubice jsou oproti skleněným cenově dražší, ale jejich pozitivem je kvalita řezání i gravírování. Tyto trubice jsou bezpečnější a mají vyšší životnost. Firma EpilogLaser uvádí životnost svých trubic až 30 let [31; 32].



Obr. 15 CO<sub>2</sub> kovová laserová trubice od firmy EpilogLaser [31].

### 2.11.2 Elektrický zdroj laserové trubice

Pro konstrukce napájecích elektrických zdrojů jsou vyžadovány různé kombinace obvodů a komponentů podle specifikací laserového systému. Pro napájení CO<sub>2</sub> laserů jsou využívány spínané zdroje napájení, které jsou určeny také pro polovodičové lasery, viz obr. 16. Polovodičové lasery využívají, oproti zdrojům pro CO<sub>2</sub> lasery, zdroje s vyšším napětím a delší dobou elektrického pulzu. Tyto zdroje budí stejnosměrný proud (DC) a za pomoci transformátoru vysoké napětí. CO<sub>2</sub> lasery s vlnovodem mohou používat vysokofrekvenční (RF) oscilované stejnosměrné zdroje napětí. Inovativní elektrické zdroje jsou vybaveny bipolárními tranzistory a regulátory. Dále jsou využívány chytré obvody, které jsou specifické a odlišné pro diodové, polovodičové a plynové lasery [34].

Zdroj je volen podle velikosti výkonu trubice. Napájecí zdroj není samostatně funkční celek. Katoda a anoda napájecího zdroje je připojena k trubici laseru. Protože se jedná a vysoce nebezpečný prvek v CO<sub>2</sub> laseru, je nutné, aby byl zdroj uzemněn. Životnost zdroje je velice vysoká. Pohybuje se okolo 100 000 pracovních hodin [30; 35].



Obr. 16 Elektrický zdroj CloudRay T100 plus [36].

### 2.11.3 Optika CO<sub>2</sub> laseru

Optika CO<sub>2</sub> laseru se liší materiálem a povlakem v závislosti na laserovém zdroji. Výběr optického mechanismu je závislý na vlnové délce. Optické prvky jsou vyráběny ze speciálních infračervených materiálů. Jejich vlnová délka je 10,6  $\mu\text{m}$ . Materiály pro výrobu optiky jsou: selenid zinečnatý (ZnSe), germanium (Ge), arsenid gallitý (GaAs) a křemík (Si). Rozsah přenášení vlnové délky je 40 nm až 2  $\mu\text{m}$ . U skleněných a nízkovýkonných trubic jsou používané optické prvky chlazené vzduchem, a to na rozdíl od kovových a vysokovýkonných trubic, kde je nutné optické prvky chladit vodou, aby nedošlo k jejich přehřátí a následnému poškození [31; 37].

V optice CO<sub>2</sub> laserů se nachází několik druhů čoček, sklíček a zrcadel potřebných pro správné vedení a zaostření laseru do ohniska řezu. Pro zaostření laseru jsou používány čočky meniskové nebo čočky konvexní. Meniskové čočky se používají tam, kde je kritický bod ostření. Tyto dva druhy čoček jsou umístěny v hlavici řezacího stroje. Pro lepší zaostření jsou čočky potaženy na povrchu antireflexní vrstvou. Tento povlak má tloušťku 10,6 μm. Tyto čočky jsou nejčastěji vyrobeny ze ZnSe (zinkoselenové čočky). Při průchodu laseru absorbují 0,2 % výkonu laseru [14; 38].

ZnSe sklíčka slouží jako ochrana před poškozením čoček v optickém systému. Sklíčka jsou lépe vyměnitelná a z finančního hlediska přijatelnější. Stejně jako čočky laseru jsou opatřena antireflexní povrchovou úpravou. Tato sklíčka chrání čočky před ostřikem odebíraného materiálu [14; 38].

Reflektory neboli zrcadla slouží k přenosu laseru do řezací hlavičky. Při dopadu laseru na zrcadlo je laser odražen pod úhlem 90°. Jako substrátový materiál slouží křemík, měď a molybden. Tyto typy zrcadel se nepovlakuje. U vysokovýkonných laserů je nutné použít povlaky. Nejčastěji se používají povlaky na bázi kovů Si a Cu. Odrazivost u povlakovaných zrcadel dosahuje vyšší než 99,7 % a u nepovlakovaných 98 % [14; 38].

Na obrázku 17 jsou znázorněna zrcadla a čočka, které byly použity při stavbě laseru.



Obr. 17 Si zrcadla s poloměrem 25 mm a ZnSe čočka s ohniskovou vzdáleností 50,8 mm a poloměrem 20 mm.

#### 2.11.4 Chlazení CO<sub>2</sub> laseru

Pro všechny druhy CO<sub>2</sub> laseru je nutné chlazení. Při nedostatečném chlazením nebo jeho úplné absenci dojde ke snížení životnosti nebo úplnému poškození laseru. Chlazení můžeme rozdělit do dvou typů: vodní a vzduchové chlazení.

Pro skleněné CO<sub>2</sub> laserové trubice se nejčastěji používá vodní chlazení. To se skládá z vodního reservoáru, který slouží jako zásobník vody, čerpadla, které tlačí vodu skrz chladicí systém a tím ochlazuje trubice, viz obr. 18. Dále systém obsahuje chladiče s elektrickými ventilátory, které ochlazují chladicí médium. Všechny tyto komponenty jsou propojeny silikonovými hadicemi. Některé chladicí systémy obsahují navíc termostat, výparník a kompresor. Tyto systémy dokážou udržet chladicí médium na stálé požadované teplotě. Tento typ chladicího systému funguje na principu klimatizace [39; 40].



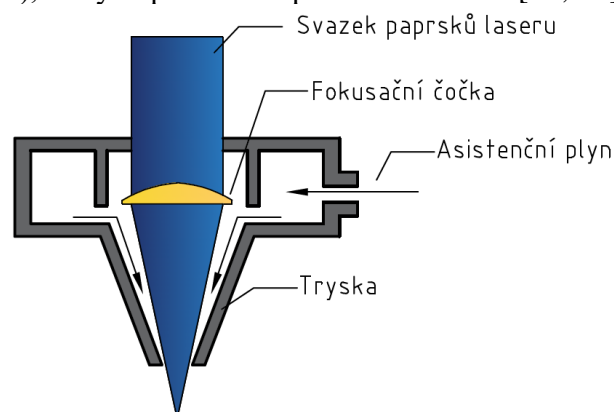
Obr. 18 Chladicí systém CW-3000 [41].

Některé typy kovových CO<sub>2</sub> trubic jsou chlazeny pouze vzduchem. Na povrchu trubice je žebrování, které zajišťuje lepší odvod tepla, viz obr. 19. Nad těmito žebry jsou umístěny elektrické ventilátory, které napomáhají lepšímu chlazení [31; 42].

Obr. 19 Kovový vzduchem chlazený CO<sub>2</sub> laser Zamia 30W [42].

### 2.11.5 Asistenční plyn

Jako asistenční plyn se u nízkovýkonných laserů používá vzduch, viz obr. 20. Ten slouží k ofuku řezací hlavice, aby nedošlo k poškození čočky, ale také zajišťuje dokonalé zaostření laseru na obrobek. Asistenční plyn vytváří podtlak v hlavici, a tím je zamezeno vnikání nežádoucích plynů do hlavy laseru. U vysokovýkonných trubic je na sublimační řezání používán jako asistenční plyn O<sub>2</sub> (kyslík), který napomáhá hoření v místě řezu. Při řezání korozivzdorných ocelí se využívá tavného řezání. Při něm je jako asistenční plyn používán N<sub>2</sub> (dusík) a Ar (argon), který napomáhá odpařování chromu [30; 43].



Obr. 20 Schématické znázornění průřezu trysky.



## 2.12 Porovnání CO<sub>2</sub> s ostatními druhy laserových technologií

Pro porovnání CO<sub>2</sub> laseru byly zvoleny různé lasery podle jejich druhu, aktivní látky, typu paprsku, výkonu laseru a oblasti aplikace. V tabulce 2.1. jsou znázorněny technické parametry jednotlivých druhů laserů.

Tab. 2.1 Rozdělení laserů [44].

Druh laseru	Aktivní látka		Vlnová délka [μm]	Typ paprsku	Výkon laseru	Oblasti aplikace
Pevné	Rubín	Cr <sup>3+</sup>	0,6943	pulzní	5 W	Holografie
	Nd-YAG	Nd <sup>3+</sup>	1,064	kontinuální pulzní	100 až 1200 W	Strojírenský průmysl
	Nd-sklo	Nd <sup>3+</sup>	1,064	pulzní	2 mW	Strojírenský průmysl
	alexandrit		0,7-0,818	pulzní	10 W	Strojírenský průmysl
Polovodičové	GaAs		0,80-0,90	pulzní	2 až 10 mW	Informační technologie, optoelektronika
Plynové	CO <sub>2</sub> (N <sub>2</sub> +He)	CO <sub>2</sub>	10,6	kontinuální nebo pulzní	500 až 15 000 W	Strojírenský průmysl
	He-Ne	Ne	0,6328; 1,15; 3,39	kontinuální	20 mW	Metrologie, geodézie, holografie
	Ar	Ar <sup>+</sup>	0,4764; 0,488; 0,5145	Kontinuální nebo pulzní	1 až 5 000 W	Laserová chirurgie
	Excimer(ArCl) (XeCl) (XeF) (KrF)		0,170 0,308 0,351 0,248	pulzní	20 W až 250 W	Fotolitografie, laserová chirurgie, strojírenství
Kapalinové	Farbivo Rhodamine 6	Etanol metanol	0,34-1,175	pulzní	100 W	Fotochemie, spektroskopie

## PRAKTICKÁ ČÁST

### 3 DEFINICE PARAMETRŮ UVAŽOVANÉHO STROJE

Uvažovaný stroj je určen pro malosériovou výrobu nebo hobby využití. Je vhodný pro dřevovýrobu, sklářský, kamenický, textilní a hračkářský průmysl. Po průzkumu trhu byl stroj konfigurován na řezání různých druhů materiálů, jako je například dřevo, plexisklo, kůže a papír. Je určen na gravírování do kamene, skla a různých druhů kovových a nekovových materiálů.

Uvažované rozměry pracovního stolu jsou 900 x 600 mm. Předpokládaná maximální výška řezaného materiálu je 350 mm v ose Z s ohledem na řezání velkoobjemových materiálů. Vnější rozměry stroje 1400 x 895 x 710 mm byly zvoleny podle rozměrů pracovní plochy. Do navrženého stroje byl zvolen CO<sub>2</sub> laser o výkonu 80 W, a to s ohledem na preferovaný způsob využití. Lasery s výkonem větším než 100 W jsou primárně určeny pro řezání, protože je výhodnější řezat na 100 % výkonu a regulovat pouze rychlost posuvu, čímž je docíleno efektivnější práce. Na rozdíl od nich stroje určené pro gravírování mají výkon 40 W. Na základě průzkumu trhu byly všechny prvky stroje voleny s ohledem na konkurenční výrobky.

#### **Základní požadavky na uvažovaný CNC CO<sub>2</sub> laser**

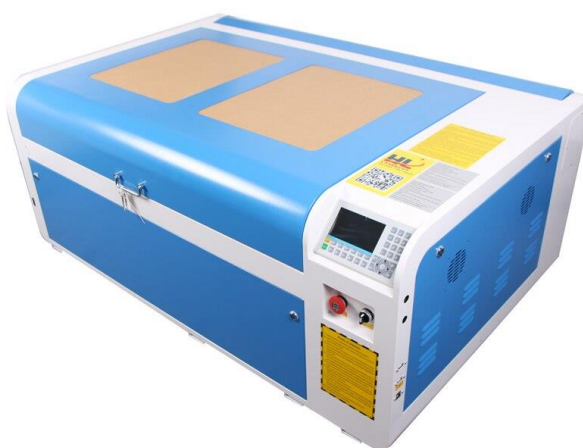
- pracovní plocha 900 × 600 × 350 mm
- schopnost řezat plast, dřevo, kůži a papír s použitím 75 % výkonu
- schopnost gravírovat kámen, hliník a výše uvedené materiály s využitím 30 % výkonu
- počítačem řízené osy X, Y, Z a přídavné rotační osy U
- zajištění tuhosti os a celé konstrukce stroje
- zajištění bezpečnosti stroje
- zvolení přídavných prvků CO<sub>2</sub> laseru (vodní chlazení, kompresor a odsávání)
- kompletnost a kompatibilita ovládacích prvků
- snadná ovladatelnost
- konkurenceschopnost

## 4 PRŮZKUM TRHU

Po průzkumu trhu byly zvoleny dva konkurenční stroje. Prvním z nich je nízkonákladový CO<sub>2</sub> laser zahraniční produkce HL-80W od firmy HL Laser Solution a jako druhý byl vybrán CO<sub>2</sub> laser BRM Budget 6090 s výkonem 80 W od společnosti Eurazio center se zastoupením v České republice.

### 4.1 HL-80W

CO<sub>2</sub> laser typu HL-80W je produkt firmy HL Laser Solution, viz obr. 21. Tento stroj byl zvolen pro svoji dostupnost a nízkou pořizovací cenu, přitom s téměř totožnými výkonnostními parametry jako stroj uvažovaný. Tento produkt je vyráběn v Čínské lidové republice. HL-80W disponuje pracovní plochou 900 × 600 mm. Pracovním stolem lze polohovat v ose Z v rozmezí 0 až 250 mm. Celkové rozměry konstrukce jsou 1440 × 940 × 640 mm. Pohon os je realizován pomocí krokových motorů 17HQ4410H. Pro řízení je používán řídicí systém Ruida RDC6445 controller. Pro generování laseru je použita skleněná trubice od firmy Reci, typ W2, o výkonu 80 W, délce 1200 mm a průměru 80 mm. Vlnová délka CO<sub>2</sub> laseru je 10,6 μm. Životnost této skleněné trubice je 10 000 pracovních hodin. Uváděný řezací stroj je primárně určen pro dělení kůže, papíru, kartonu, plexiskla, dřeva a textilu. Rám je svařen z profilu 30 × 30 × 2 mm, z materiálu S235JR. Krytování je zde tvořeno z ohýbaného hliníkového plechu o tloušťce 3 mm. Pracovní stůl je tvořen deskou s otvory ve tvaru včelí plástve (honeycomb), nebo sadou nožů. Prodejní cena tohoto stroje je 65 560 Kč (2 980 dolarů). Do ceny není zahrnuta pořizovací cena kompresoru, chlazení a náklady na dopravu, včetně cla a DPH [45].



Obr. 21 CO<sub>2</sub> laser typu HL-80W [45].

### 4.2 BRM Budget

Jako druhý konkurenční produkt pro můj CO<sub>2</sub> laser byl vybrán CO<sub>2</sub> laser BRM Budget 6090, viz obr. 22. Tento stroj disponuje výkonem laseru 80 W. BRM Budget 6090 je primárně určen pro domácí využití. Výrobce udává, že není vhodný pro sériovou výrobu. Celková hmotnost CO<sub>2</sub> laseru je 280 kg. Vlnová délka CO<sub>2</sub> laseru je 10,6 μm. Pracovní stůl o rozměrech 600 × 900 mm je tvořen deskou s otvory ve tvaru včelí plástve. Stroj je schopen řezat materiál o maximální tloušťce 280 mm v ose Z. V různých konfiguracích je možné mít

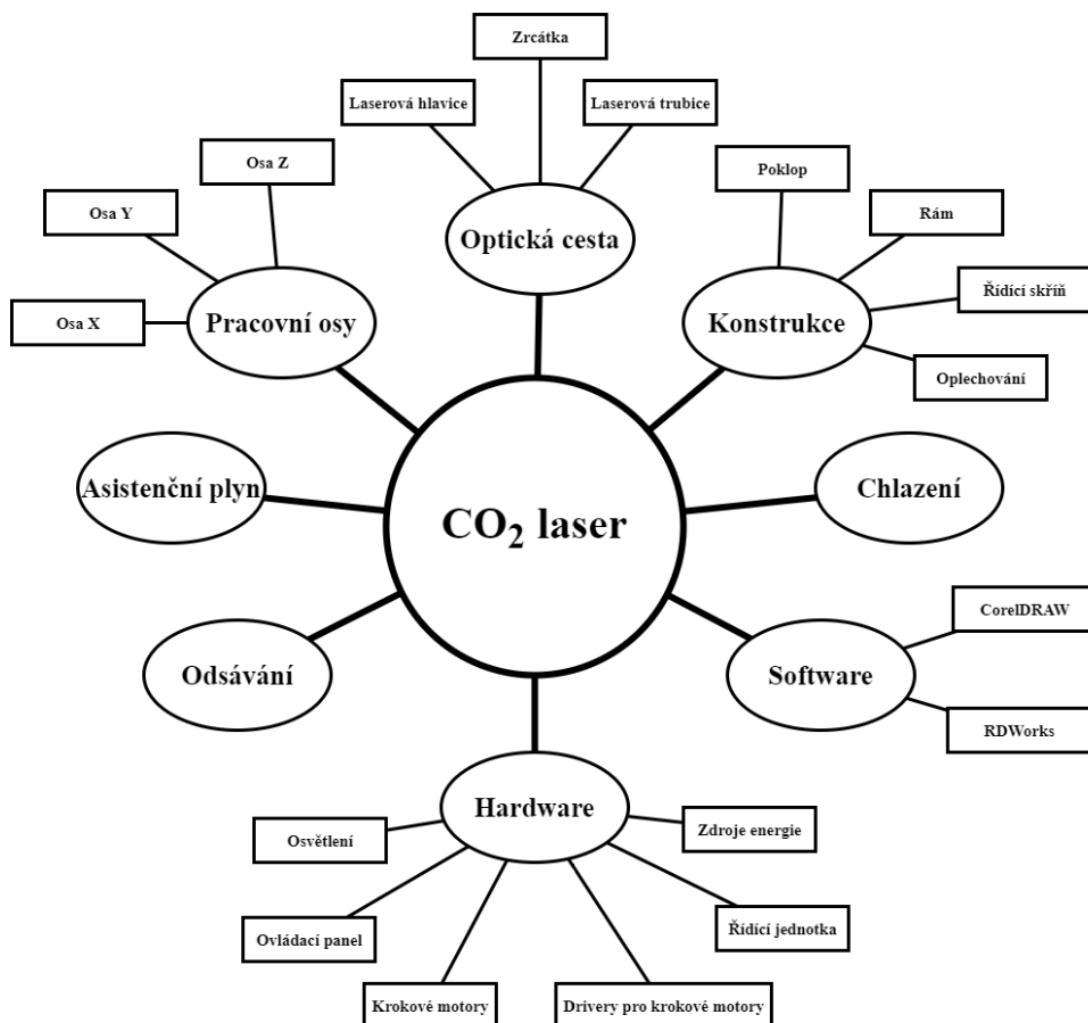
automatické polohování trysky v ose Z. Maximální rychlost posuvu je až  $1\,000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Přesnost v rovině XY se pohybuje  $\pm 0,1\text{ mm}$ . Vnější rozměr stroje je  $1750 \times 1140 \times 1040\text{ mm}$ . Ve stroji je instalována filtrace vzduchu BRM Extractor od firmy BOFA s třístupňovou filtrací spodin s účinností 95 %. Stroj je určen pro řezání dřeva, korku, kůží, gumy, papíru a textilu. Cena za samostatný CO<sub>2</sub> laser BRM Budget 6090-80 je 201 500 Kč (7 690 euro) bez příslušenství (doprava, instalace laseru, softwarové řízení, ofuku materiálu, filtrace vzduchu BRM Extractor M) [46].



Obr. 22 CO<sub>2</sub> laser typu BRM Budget 6090 [46].

## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ A REALIZACE

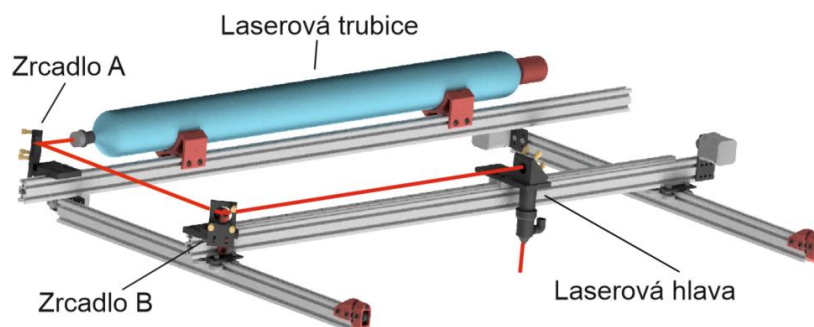
Pro konstrukční řešení byl nejprve vytvořen 3D model základní konstrukce, všech pracovních os a optické cesty. 3D modely byly vytvořeny pomocí softwarů SolidWorks a Autodesk Inventor. V dalším kroku byl prozkoumán trh s nabídkou materiálů na sestavení konstrukce, optické cesty, pracovních os, chlazení, odsávání, asistenčního plynu, hardwaru a softwaru. Na obrázku 23 je znázorněno schéma postupu pro návrh CO<sub>2</sub> laseru.



Obr. 23 Schéma realizace CO<sub>2</sub> laseru.

### 5.1 Optická cesta

Nejdůležitějším prvkem pro sestavení laserového stroje je optická cesta, viz obr. 24, která je tvořena laserovou trubicí, zrcadly a laserovou hlavicí. Tyto prvky jsou používány pro přenos a usměrnění paprsku, aby byl navržený stroj schopen řezat nebo gravírovat.



Obr. 24 Schéma optické cesty paprsku.

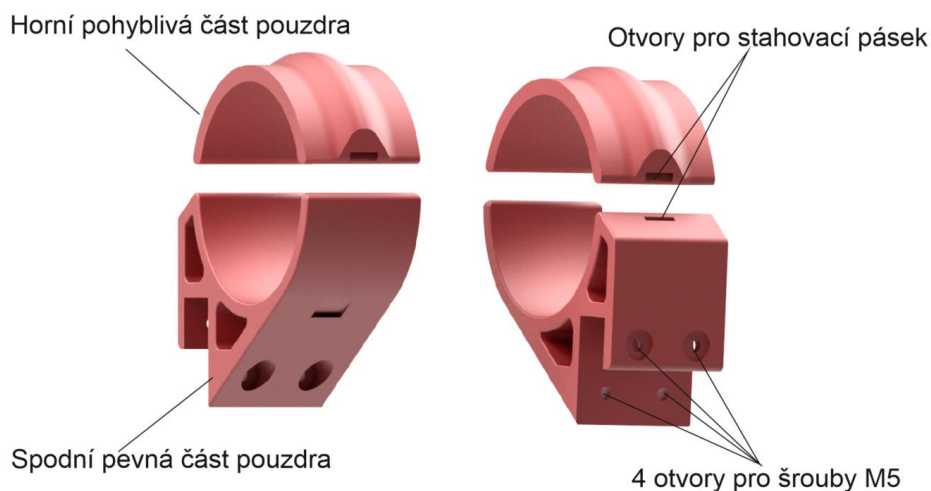
### 5.1.1 Laserová trubice a uchycení

#### Reci W1

S ohledem na použití laserového stroje byla zvolena skleněná laserová trubice Reci W1 o výkonu 80 W od firmy Cloudray, která svými výkonnostními parametry vyhovuje pro řezání velkého spektra materiálů a je vhodná také pro gravírování. Tento výkon je dostatečný pro bezproblémové řezání a gravírování papíru, plastu a dřeva. Dále je schopen gravírovat sklo, kámen nebo hliníkové slitiny, ale vše závisí na odrazivosti světla od povrchu obrobku. Životnost udávaná výrobcem je 10 000 hodin. Vlnová délka této laserové trubice je 10,6  $\mu\text{m}$ . Reci W1 o průměru 80 mm je dlouhá 1050 mm. Tento typ trubice je nutné chladit vodou, aby nedošlo k jejímu poškození. Vnější rozměry konstrukce byly voleny podle velikosti trubice typu W1. Pro její uchycení byla navržena speciální dvoudílná pouzdra. Ta se skládají ze dvou částí a jsou upevněna ve směru osy X. Na obrázku 14 je znázorněna trubice Reci W1 od firmy Cloudray. Při návrhu stroje byl uvažován i kovový, vzduchem chlazený CO<sub>2</sub> laser. Tento typ laseru je spolehlivější a bezpečnější, ale také několika násobně dražší než skleněné trubice.

#### Dvoudílné pouzdro laserové trubice

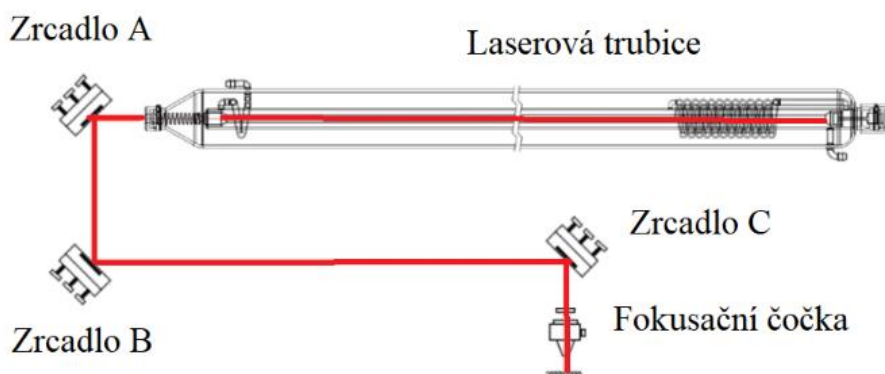
Trubice je připevněna ke konstrukci pomocí speciálně navržených pouzder, viz obr. 25. Ta byla vymyšlena tak, aby se dala vyrobit pomocí FDM 3D tisku. Zvolený materiál pro výrobu je Prusa PETG 1,75 mm. Výrobní postup je popsán v sekci Díly vyrobené pomocí FDM technologie. Pouzdra se skládají ze dvou částí. Spodní část je pevně uchycena k hliníkovému profilu s označením 6 20 × 40 pomocí 4 šroubů M5. Vrchní část je pohyblivá a je uchycena k pevné spodní části upínky pomocí stahovacích pásek SAPI 360 × 7,5 mm. Pouzdra jsou navržena tak, aby seděla na zvolenou trubici o průměru 80 mm. Opěrná část, kde přichází ke styku trubice s pouzdrém, byla vystlána kaučukovou EPDM těsnicí páskou s uzavřenou buněčnou strukturou. EPDM těsnění má velmi malou tvarovou paměť, je odolné vůči UV záření a jeho tepelná odolnost je od -40 °C do 95 °C. Toto těsnění má šířku 50 mm a tloušťku 2 mm. Pro tuto skutečnost byly rozměry pásky započítány do celkových rozměrů pouzder a stykové části pouzdra s trubicí byly navrženy s velikostí rádiusu R42. Polohování skleněné trubice je velice obtížné kvůli pevnému uchycení pouzder ke konstrukci. Polohování trubice je možné pouze pomocí korekce rámu. Z tohoto důvodu by při sériové výrobě laserového stroje muselo být uchycení předěláno. Toto konstrukční řešení bylo tedy zvoleno pro zjednodušení výroby pomocí 3D tisku.



Obr. 25 Dvoudílné pouzdro laserové trubice.

### 5.1.2 Zrcadla, fokusační čočka a montáž

Zrcadla, držáky zrcadel a hlavice laseru byly pořizovány od firmy Cloudray, a to na základě prokázané spolehlivosti, průzkumu trhu a ohlasů či recenzí zákazníků.

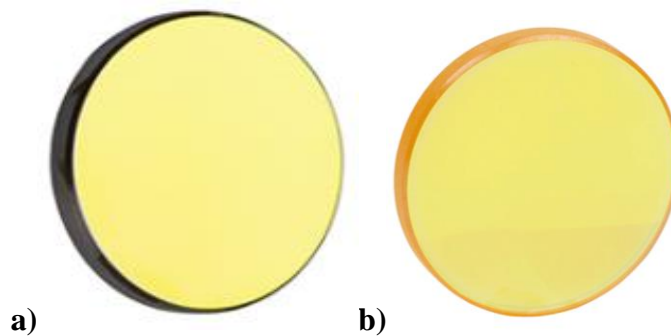


Obr. 26 Schématické znázornění umístění jednotlivých zrcadel a fokusační čočky.

#### Použitá zrcadla

Pro lasery o výkonu 60 W a vyšším je doporučeno použít zrcadla molybdenová nebo křemíková. Zrcadla s molybdenovým povlakem jsou vyrobena z leštěného kovu, ale jsou poněkud širší. Také mají nižší stupeň odrazivosti oproti zrcadlům s povlakem křemíku. Protože hlavním kritériem volby byla odrazivost paprsku, zvolena tedy byla křemíková zrcadla.

Zrcadla, která jsou na obrázku 26 na pozicích A, B a C, jsou od firmy Cloudray. Jsou povlakována křemíkem, viz obr. 27a). Výrobce udává, že odrazivost zrcadel je větší než 96 %. Zrcadla mají průměr 25 mm a tloušťku 3 mm. Tato zrcadla jsou vhodná pro lasery o výkonu 60 až 300 W, s vlnovou délkou 10,6  $\mu\text{m}$ . Zrcadla určená pro tento výkon není nutné chladit vodou. Nutnost jejich chlazení je dána výkonem použité laserové trubice.

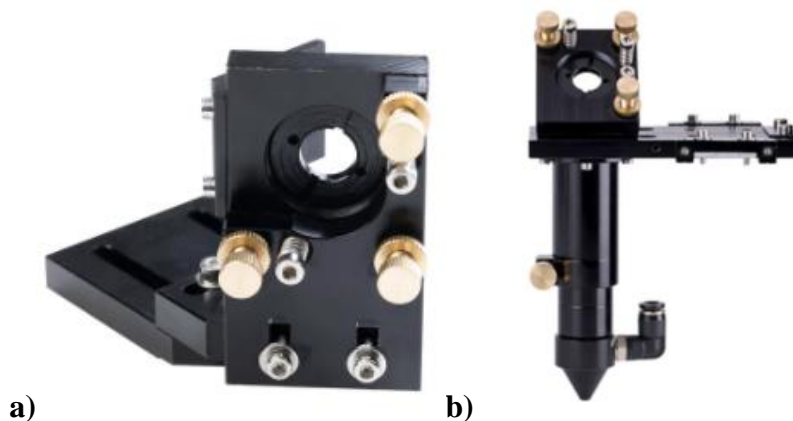


Obr. 27 a) Si zrcadlo s poloměrem 25 mm od firmy Cloudray, b) ZnSe fokusační čočka od firmy Cloudray.

V laserové hlavici je umístěna ZnSe čočka meniskového tvaru od firmy Cloudray, viz obr. 27b). Meniskové čočky jsou vhodnější než čočky plankonvexní, protože mají přesnější ohnisko. Mají ohniskovou vzdálenost 50,8 mm a průměr 20 mm. Jsou vhodné pro lasery s vlnovou délkou 10,6  $\mu\text{m}$ , protože jsou povlakovány ze ZnSe. Povlak má propustnost 99,5 % laserového paprsku.

#### Držák zrcadla

Pro uchycení zrcadel na pozicích A a B (viz obr. 26) byly použity držáky série C od firmy Cloudray, viz obr. 28a). Tyto držáky jsou plně nastavitelné v ose X, Y a Z pomocí šroubů určených k seřízení paprsku do středu zrcadla. Tento typ držáku je vhodný pro zrcadla o průměru 25 mm a maximální tloušťce až 4 mm. Materiál, ze kterého jsou držáky vyrobeny, je z hliníkové slitiny.



Obr. 28 a) Držák zrcadel typu C od firmy Cloudray, b) Laserová hlava typu C od firmy Cloudray.

#### Laserová hlava

Pro usměrnění a nasměrování paprsku do požadovaného místa byla použita laserová hlava série C od firmy Cloudray, viz obr. 28 b). Je uzpůsobena pro fokusační čočky o průměru 20 mm a ohniskové vzdálenosti 38,1 mm, 50,8 mm, 63,5 mm a 101,6 mm. Hlava je vybavena přívodem pro asistenční plyn o průměru hadice 6 mm. V hlavici je implementován plně nastavitelný držák zrcadla o průměru 25 mm a napínák řemenu, který je následně využit pro osu X. Na trysku je umístěn red dot, který slouží jako ukazatel toho, v jakém místě laserový paprsek bude řezat.



## 5.2 Konstrukce

### 5.2.1 Hliníkové profily

Pro výrobu laserového stroje byly zvoleny profily od české firmy ASKMT. Ve výrobě byly použity profily  $620 \times 20$  a profily  $620 \times 40$ , viz obr. 29. Jsou vybaveny T drážkou a pro vedení lineárních vozíků jsou použity profily s V drážkou. Pro výrobu bylo využito 45 m hliníkových profilů. Na spojování byly použity šrouby M5, M4 a M3 různých délek a speciální druhy matic do T profilů, jako například rotační T matice a T matice s pojistnou kuličkou. Dále byly využity hliníkové trojúhelníkové spojovací rohy  $20 \times 20$  mm a  $20 \times 28$  mm.



Obr. 29 Hliníkové profily potřebné pro realizaci CO<sub>2</sub> laserového stroje.

Profily byly dodány firmou ASKMT v základní délce 3 m, proto je bylo nutné následně zpracovat. Profily byly naměřeny na požadovanou délku podle vytvořeného 3D modelu. Po rozplánování a označení bylo možné profily nařezat. Pro dělení materiálu byla použita pokosová pila Parkside PKS 1500 B3 s řezným pilovým kotoučem Parkside PKSB 210 B1 určeným na řezání dřeva, plastů, kompozitních materiálů a barevných kovů, jako jsou například hliníkové slitiny, viz obr. 30. Po nařezání hliníkových profilů bylo nutné místo řezu odjehlit pomocí pilníků.



Obr. 30 Postup řezání hliníkových profilů pomocí pokosové pily.

### 5.2.2 Spojovací prvky

Protože byl rám volen jako rozebíratelný a plně modifikovatelný, byly použity pevnostní šrouby M3, M4 a M5 DIN 912 Ocel 10.9 bez povrchové úpravy a různých délek. Dále byly použity pojistné matice M5 DIN 985, matice M5 a M3 DIN 934, speciální rotační

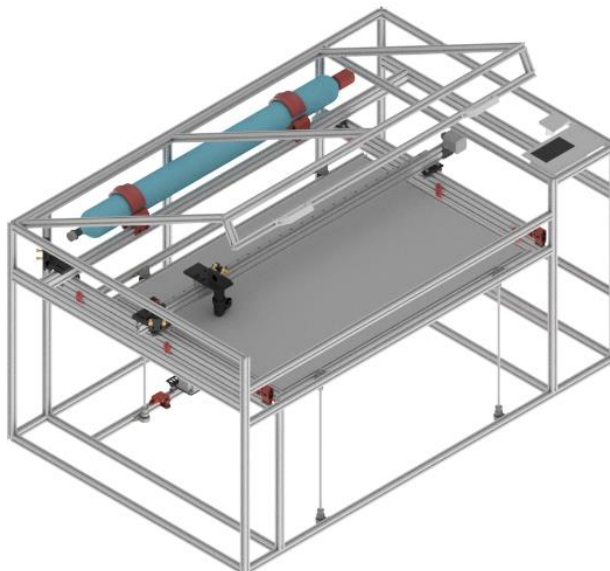
matice M3 a M5 do profilu s T drážkou a matice M3 a M5 do profilu s T drážkou. Pro zajištění pravých úhlů a souososti celého rámu stroje byly použity rohové hliníkové úhelníky o rozměrech  $20 \times 20$  mm a  $20 \times 28$  mm. Na obrázku 31 je znázorněna fotografie použitých spojovacích materiálů.



Obr. 31 Spojovací materiál.

### 5.2.3 Rám

Z důvodu možnosti konstrukčních změn v návrhu konstrukce byly pro výrobu zvoleny šroubovatelné hliníkové profily od české firmy ASKMT. Ty jsou vhodné i pro svoji nízkou objemovou hmotnost a vysokou pevnost. Ve výrobě byly použity profily  $6 \times 20 \times 20$  a profily  $6 \times 20 \times 40$ . Vnější rozměry stroje jsou  $1400 \times 895 \times 710$  mm. Na obrázku 32 je vyobrazen 3D model laserového stroje.



Obr. 32 3D model rámu laserového stroje.

V případě uvažované sériové výroby by bylo vhodné již odladěný rám převést na svařenec tvořený ocelovými profily  $30 \times 30$  mm s tloušťkou stěny 2 mm, nebo ocelový profil  $20 \times 20$  mm s tloušťkou 2 mm z materiálu jakosti S235JR válcovaný za tepla. Tyto profily

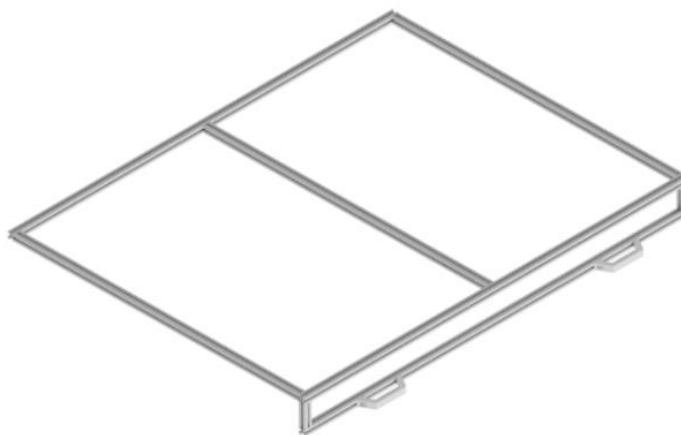
jsou finančně přijatelnější a pevnější než hliníkové tvarové profily. Na jejich spojení by bylo zvolilo svařování technologií MAG. Při tomto typu svařování je používán aktivní CO<sub>2</sub> plyn a tavná elektroda. Největší výhodou svaru je, že se jedná o nerozebíratelný spoj. Svařování velice přesného rámu je náročné z důvodu vytváření vnitřního pnutí. Jako svářecí stroj byl zvolen Automig 200 XE a materiál HUATONG HTW 50. Na obrázku 33 je fotografie základního hliníkového rámu laserového stroje.



Obr. 33 Hliníkový rám laserového stroje.

#### 5.2.4 Poklop

Poklop (viz obr. 34) byl konstruován tak, aby umožňoval bezproblémový přístup k pracovnímu stolu a zaručoval bezpečnost práce při obsluze stroje. Rám poklopu byl zrealizován z hliníkových profilů 6 20 × 20 od firmy ASKMT. Pro jednodušší manipulaci byla na čelo poklopu přišroubována dvě hliníková madla.



Obr. 34 Model rámu poklopu.

Jako krycí materiál bylo použito oranžové průhledné plexisklo Perspex Amber 300 o tloušťce 3 mm, které slouží jako bezpečnostní prvek stroje. Obsluha stroje je chráněna před vzniklým UV zářením generovaným z laseru i před fyzickým úrazem. Průhledné plexisklo bylo voleno z důvodu průběžné vizuální kontroly při řezání. Bylo nařezáno pomocí CO<sub>2</sub> laseru ve firmě KOPLAST. Z důvodu váhy poklopu na něj byly umístěny dva písty i s úchyty, a to od firmy KAK Handle Store. Jeden píst má vymršťovací sílu 150 N. Průměr pístu je 15 mm a maximální délka je 270 mm. Poklop byl přichycen ke konstrukci pomocí tří hliníkových pantů uzpůsobených na hliníkové profily 20 × 20 mm. Na obrázku 35 je vyobrazen zkompletovaný poklop.



Obr. 35 Zkompletovaný poklop.

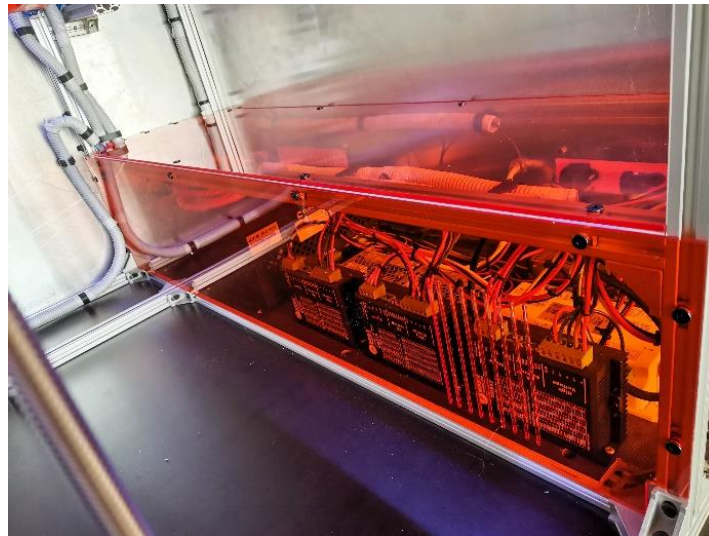
### 5.2.5 Řídicí skříň

Řídicí skříň je umístěna v pravé spodní části laserového stroje, viz obr. 36. Jsou v ní umístěny napájecí zdroje, řídicí systém a drivery krokových motorů. Spodní část skříně tvoří protiskluzová březová překližka, která byla použita jako podstava laserového stroje. Všechny komponenty byly připevněny k této podložce pomocí samořezných šroubů o průměru 3 mm a délce 10 mm. Kabelový systém byl veden chráničkami kabelů, které byly připevněny k rámu speciálně navrženými upínkami.



Obr. 36 Řídicí skříň.

Zakrytování řídicí skříně je tvořeno polymethylmethakrylátem (PMMA) o tloušťce 3 mm. Do vnitřní strany krytu skříně byla vyřezána žebra pro zajištění cirkulace vzduchu pro chlazení elektroniky uvnitř skříně a nasávání vzduchu pro zajištění odvádění zplodin z pracovního prostoru. Otvory a žebrování byly vyřezány pomocí stávajícího CO<sub>2</sub> laserového stroje. Na vnější straně oplechování je navržena mřížka pro hlavní přívod vzduchu. Chlazení řídicí skříně je zajištěno centrálním odsávacím systémem. Na této straně byl umístěn panel pro zapojení externího paměťového zařízení, počítače nebo ethernetového kabelu, který byl vytištěn pomocí 3D tiskárny FDM technologií. Na obrázku 37 je vyfocena zakrytovaná řídicí skříň.



Obr. 37 Zakrytovaná řídicí skříň.

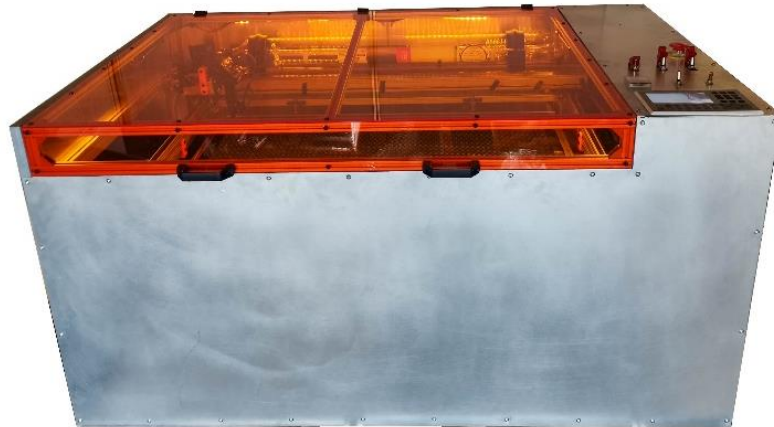
### 5.2.6 Krytování

Na vnější krytování celého stroje byl zvolen hliníkový plech PN 42 7305 o rozměrech  $0,8 \times 1000 \times 2000$  mm. Tento typ byl zvolen pro hmotnost materiálu a náročnost k obrábění. Jakékoliv úpravy rozměrů nebo vrtání bude jednodušší než zpracovávat ocelové tabule. Pro rozdělení hliníkových tabulí na základní rozměry byly použity hydraulické tabulové nůžky. Na obrázku 38 je znázorněna pravá bočnice s mřížkou pro přívod vzduchu a panelem pro zapojení externího paměťového zařízení a ethernetového kabelu.



Obr. 38 Pravá bočnice s mřížkou pro přívod vzduchu a panelem pro zapojení externího paměťového zařízení a ethernetového kabelu.

Následně byly pomocí oscilační pily Bosh PMF 190 E s bimetalovým segmentovým pilovým kotoučem s označením ACZ 85 EB vytvořeny otvory větších rozměrů. Zbylé otvory byly vyvrtány pomocí ruční vrtačky s vrtáky z HSS oceli. Na místa, kde zůstaly odhaleny hliníkové profily, byly vyrobeny záslepky, které slouží jako imitace oplechování. Tyto záslepky byly vyrobeny pomocí 3D tiskárny. Na obrázku 39 je znázorněn dokončený stroj s oplechováním.



Obr. 39 Dokončený stroj s oplechováním.

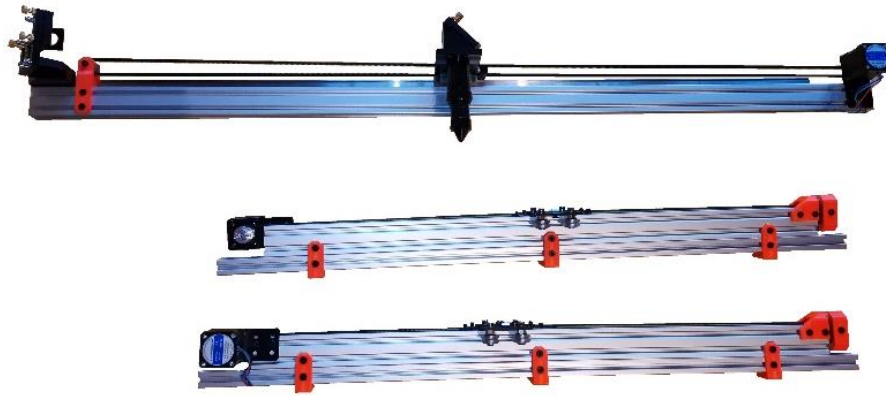
Jako podstava stroje byla zvolena protiskluzová březová překližka o tloušťce 9 mm. Tento materiál byl zvolen proto, že se sníží přenos vibrací zapříčiněných pohybem stroje do okolního prostředí. Protiskluzná část desky je orientována směrem dolů ze stroje. Pro nařezání byla použita formátovací pila Holzmann FKS 305 VF. Do překližky byly vyvrtány otvory, které souvisely s upnutím k rámu stroje, viz obr 40.



Obr. 40 Podstava laserového stroje.

### 5.3 Pracovní osy

Pracovní osy jsou poháněny pomocí krokových motorů, které jsou voleny podle požadovaných rychlostí posuvu a kroutícího momentu. Pro přenos energie z krokových motorů na poháněný prvek jsou používány řemeny a řemenice. Pro správné předeptnutí řemenu byly navrženy speciální napínáky a držáky řemenic. Tyto prvky byly vyrobeny pomocí 3D tisku FDM technologií. Na obrázku 41 jsou vyobrazeny sestavené osy X a Y.



Obr. 41 Sestavené osy X a Y.

### 5.3.1 Osa X

Základním prvkem osy X (viz obr. 42) je hliníkový profil 6 20 × 40 s T drážkou o délce 1175 mm od firmy ASKMT. Na něj je připevněno pomocí šroubů M3 a matic určených pro hliníkový profil s T drážkou širokou 6 mm lineární vedení o délce 1000 mm. Zvoleným lineárním vozíkem je vozík typu MGN15H. Na profil jsou upevněny optické prvky. Těmi jsou držák zrcadla typu C a laserová hlava, která je upevněna na lineární vozík. Pro pohyb laserové hlavy v ose X slouží krokový motor typu NEMA 17 s řemenicí, který je uchycen na hliníkové desce s vyfrézovanými otvory. Tato deska byla vyrobena firmou Link CNC Official Store. Pro uchycení rolny řemenice a mechanického limitního spínače byly navrženy speciální úchyty, jež byly vyrobeny pomocí 3D tisku. Všechny tyto prvky jsou připevněny pomocí šroubů M5. Maximální testovaná řezná rychlost v ose X je  $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 42 Model konstrukce osy X.

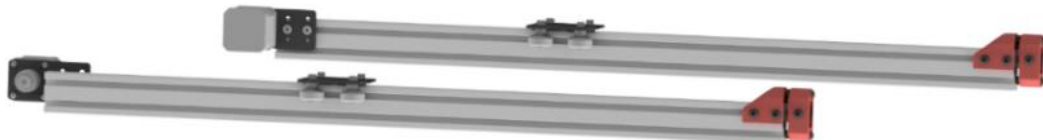
Řemenice osy X (viz obr. 43) byla navržena tak, aby byla snadno vyrobitelná pomocí 3D tisku. Tělo řemenice bylo tištěno z materiálu PETG pomocí FDM technologie 3D tisku. Do řemenice je pomocí šroubu M5 a pojistné matice M5 přišroubována hladká plastová kladka s ložiskem. Řemenice je připevněna k hliníkovému profilu pomocí M5 šroubu s T maticemi.



Obr. 43 Model řemenice osy X.

### 5.3.2 Osa Y

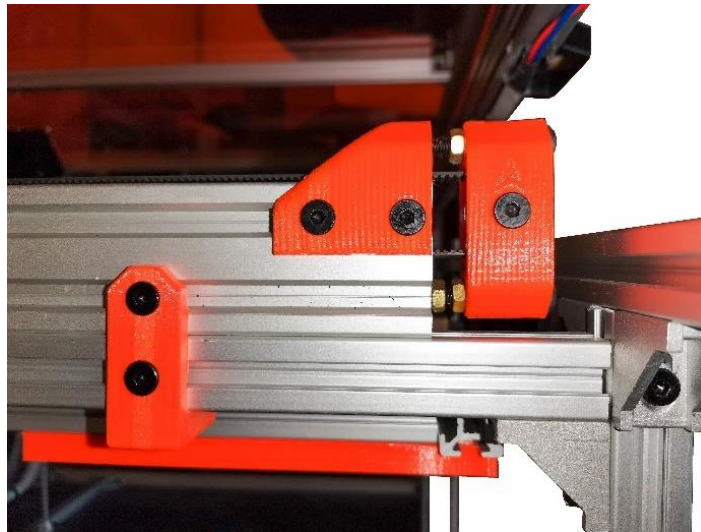
Osa Y je složena ze dvou zrcadlově stejných pojezdových ližin, viz obr. 44. Základním prvkem je hliníkový profil 6 20 × 40 s V drážkou o délce 740 mm od firmy ASKMT. Na základní profil je pomocí hliníkové desky od firmy Link CNC Official Store upevněn krokový motor NEMA 17, stejně jako u osy X. Pro pohyb v ose Y byl zvolen pojezdový vozík, který byl postaven ze speciální hliníkové destičky a pojezdových kol s označením 625ZZ, která jsou přizpůsobena pro uchycení ve V drážce osy Y a na hliníkovém profilu osy X. Pro přenos síly z krokového motoru slouží řemeny široké 9 mm. Řemen je upnut pomocí napínáků, ve kterých jsou umístěny rolny. Tyto napínáky řemene byly navrženy tak, aby byly snadno vyrobitelné pomocí 3D tisku. Napínák se skládá ze dvou tištěných částí a rolny. Osa Y je pevně přišroubována ke konstrukci stroje pomocí speciálně navržených tří upínek a šroubů M5. Maximální testovaná řezná posuvová rychlost v této ose je  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 44 Model konstrukce osy Y.

Řemenice osy Y byly navrženy tak, aby zároveň sloužily jako napínáky řemenu. Řemenice se skládá ze dvou částí, které jsou tištěny z materiálu PETG pomocí 3D tiskárny. Jedna část je pevně uchycena k hliníkovému profilu (ose Y), která slouží jako jeden opěrný bod pro pohyblivou část řemenice. Na druhé části řemenice je připevněna plastová kladka s ložiskem, po které je veden řemen. Dále jsou zde implementovány dva šrouby M5 o délce 40 mm, které jsou využívány pro správné předepnutí řemenu. Na obrázku 45 je znázorněna řemenice osy Y a upínka osy k rámu stroje.





Obr. 45 Řemenice osy Y a upínka osy k rámu stroje.

Pro upnutí osy Y bylo nutné navrhnout upínky, které budou schopny zajistit potřebnou tuhost. Tělo tohoto dílu bylo vyrobeno z materiálu PETG pomocí 3D tisku. Upínka obsahuje 5 otvorů na šrouby, které slouží k pevnému spojení dvou hliníkových profilů. Pro zajištění vysoké pevnosti bylo na konstrukci osy Y umístěno 6 upínek, viz. obrázek 45.

Pro zajištění pohybu v ose Y slouží 2 sestavené vozíky, viz obr. 46. Základním prvkem vozíku je hliníková destička o rozměrech  $65 \times 65 \times 3$  mm a na ní jsou přichycena 4 pojezdová kola určená pro posuv ve V drážce. Tyto vozíky jsou napevno uchyceny k ose X.

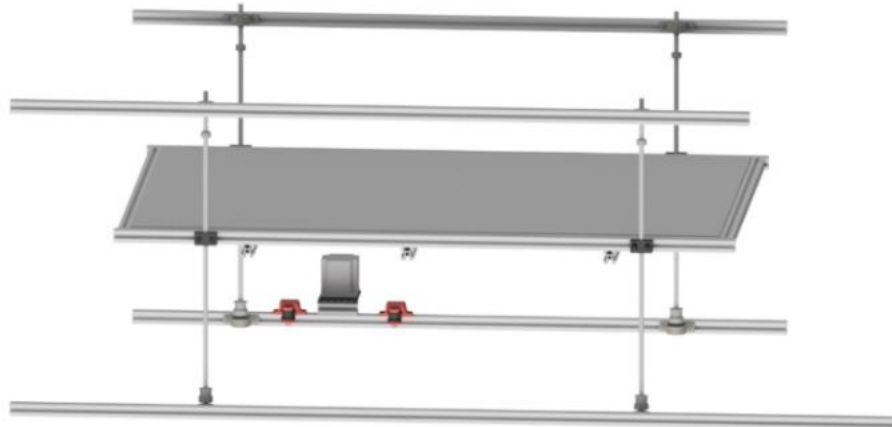


Obr. 46 Řemenice osy Y a upínka osy k rámu stroje.

### 5.3.3 Osa Z

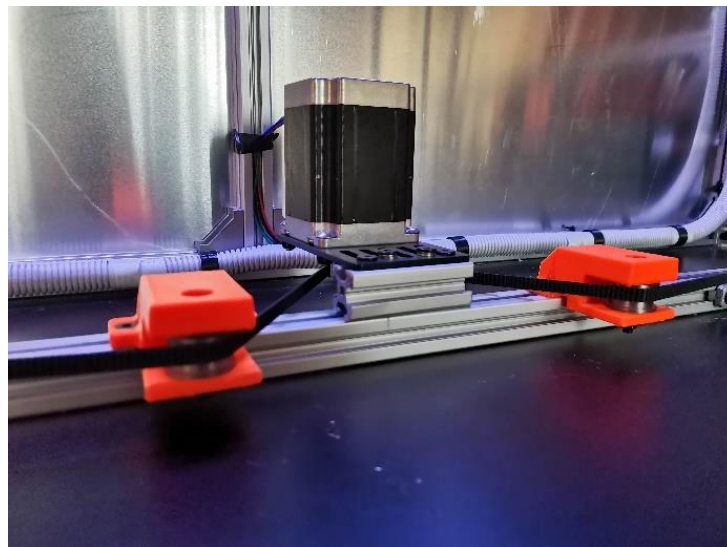
Osa Z primárně slouží k posuvu pracovního stolu a k polohování obrobku k řezné hlavici při řezání. Pro posuv v ose Z slouží 4 trapézové šrouby T8 o délce 500 mm a speciální matice ve tvaru bloku připevněného k pracovnímu stolu. Šrouby jsou uchyceny ke konstrukci stroje pomocí pouzder s ložisky. Jako zdroj pohybové energie slouží krokový motor NEMA 23, který přenáší svou energii do trapézových šroubů pomocí řemene a řemenic. Byl použit 2500 mm dlouhý řemen o šířce 6 mm. Pro správné předepnutí řemenu byly navrženy dvě pevné napínací kladky, vyrobené pomocí 3D tiskárny. Pro zajištění bezpečnosti proti nárazu stolu do řezné hlavice byly navrženy 4 prstencové dorazy, které

jsou připevněny do požadované výšky na trapézových šroubech. Na obrázku 47 je vyobrazen model konstrukce osy Z.



Obr. 47 Model konstrukce osy Z.

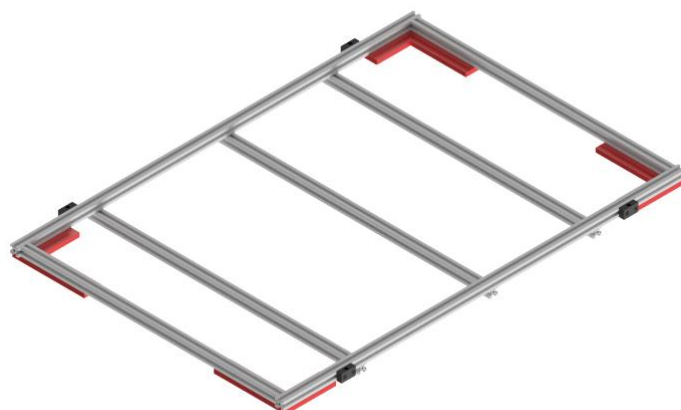
Pro správné předeptnutí a vedení řemenu byly navrženy dvě stejné řemenice. Tělo řemenu bylo vyrobeno z materiálu PETG pomocí 3D tisku FDM technologií. Řemenice byly upnuty k základní konstrukci pomocí 2 M5 šroubů, viz obr. 48. Na řemenice je M5 šroubem a pojistnou maticí připevněna plastová kladka s ložiskem. Maximální posuvová rychlost byla nastavena na  $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 48 Řemenový systém osy Z.

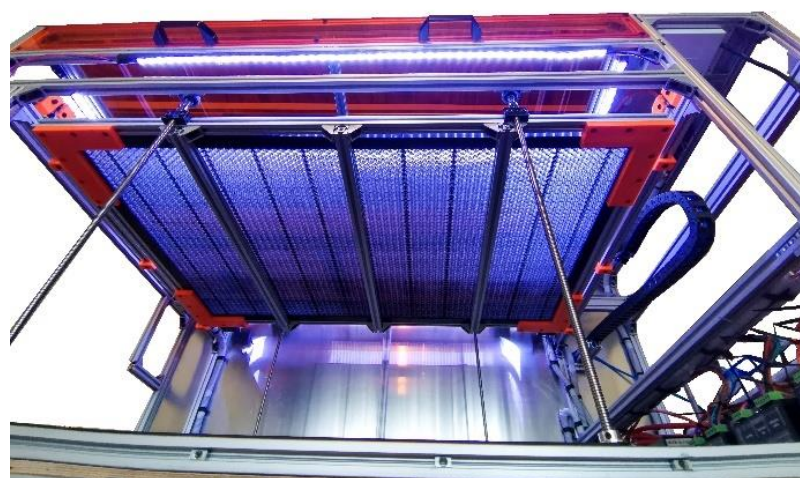
#### 5.3.4 Pracovní stůl

K trapézovým šroubům byl pomocí matic uzpůsobených k uchycení na hliníkové profily připevněn pracovní stůl, viz obr. 49. Jeho konstrukce byla zrealizována z hliníkových profilů  $620 \times 40$  od firmy ASKMT. Do konstrukce pracovního stolu byla upnuta mřížka ve tvaru včelí plástve o rozměrech  $600 \times 900 \text{ mm}$ . Pro upnutí byly navrženy a vyrobeny speciální upínky pomocí 3D tiskárny.



Obr. 49 Model pracovního stolu.

Pro uchycení profilů k sobě a uchycení pracovní desky pracovního stolu byly navrženy pravoúhlé upínky. Každá upínka je přichycena pomocí 6 šroubů. Tento díl byl vyroben pomocí 3D tisku z materiálu PETG. Na obrázku 50 je znázorněna spodní část pracovního stolu s voštinou a upínkami.



Obr. 50 Spodní část pracovního stolu s upínkami.

## 5.4 Hardware

Hardware označuje veškeré technické vybavení stroje, které je ve stroji umístěno a fyzicky se zde nachází. A to na rozdíl od dat a programů nahraných v řídicím systému.

### 5.4.1 Zdroje energie

Na napájení všech prvků stroje bylo nutné zvolit zdroje energie, které byly určeny podle technických parametrů daných spotřebičů. Všechny zdroje jsou uzemněny a obsahují bezpečnostní vypínače. Na obrázku 51 jsou vyfoceny zdroje elektrické energie.



Obr. 51 Zdroje elektrické energie.

Pro napájení laserové trubice byl zvolen zdroj typu T 100 Plus od firmy CloudRay. Tento typ zdroje je určen pro skleněné laserové CO<sub>2</sub> trubice do výkonu 100 W. V případě potřeby je možné do stroje umístit laserovou trubicí do výkonu 100 W. Vstupní napětí do zdroje je 220 V. Výstupní napětí zdroje je 40 KV a proud 28 mA, proto je nutné zdroj bezpečně uzemnit. Tento zdroj je znázorněn na obrázku 16.

Pro napájení řídicího systému, LED osvětlení, driverů a krokových motorů byly zvoleny dva napájecí zdroje LRS-75-24 od firmy CloudRay. Vstupní napětí do zdroje je 220 V, výstupní napětí 24 V a proud 3,2 A. Tento typ zdroje byl volen podle množství odebíraného proudu spotřebiči. Pro napájení red dotu byl zvolen zdroj, který má vstupní napětí 220 V, výstupní střídavé napětí 5 V a proud 2 A.

#### 5.4.2 Řídicí jednotka

##### Ruida RDC6445G

Jako řídicí systém byl uvažován systém Ruida RDC6445G od firmy Clouday. Tento systém je levnějším ekvivalentem řídicího systému R6 DSP R6445G od firmy Lightobject, ale se stejnými výkonnostními parametry. Řídicí systém obsahuje přehledný panel s displejem, který je umístěn na ovládacím panelu. Zvolený systém je kompatibilní s komerčně používanými počítačovými programy, jako je například CorelDraw nebo AutoCAD. Do řídicí jednotky jsou zapojeny drivery krokových motorů, zdroj laserové trubice a koncové mechanické spínače pro osy X a Y. V osách X a Y je uvažován koncový limitní bod s označením CMV103D od firmy Clouday. Tento prvek má operační rychlost  $5 - 500 \text{ mm.s}^{-1}$ . Z řídicí jednotky jsou vyvedeny vstupy pro zapojení ethernetového kabelu, paměťového zařízení nebo přímo počítače se softwarem určeným pro tento řídicí systém. Tento systém umožňuje zapojení dvou laserových trubic a rotační osy U (rotace kolem osy X). Na obrázku 52 je znázorněn ovladač řídicí jednotky.



Obr. 52 Ovladač řídicí jednotky.

### 5.4.3 Drivery pro krokové motory

#### Driver DM542

Pro řízení krokových motorů byly zvoleny krokové drivery DM542 20-50 V 1,0 - 4,2 A. Tyto drivery jsou vysoce kvalitní a zajišťují nízkou hlučnost motorů při zatížení. Vstupní frekvenční puls dosahuje až 200 kHz. DM542 jsou schopny automatického snížení volnoběžného proudu a jsou programovatelné v mikro krocích. Tento druh driverů je plně nastavitelný pomocí přepínačů SW.

### 5.4.4 Krokové motory

#### Krokový motor Nema 17

Na osy X a Y jsou umístěny krokové motory s označením 17HS19-2004S1 od firmy Stepperonline. Úhel jednoho kroku je  $1,8^\circ$ , a to s přesností 5 %. Tyto motory dosahují kroutícího momentu 0,59 N.m. Odebíraný proud je 2,0 A a pracovní stejnosměrné napětí je 12-24 V. Hmotnost jednoho krokového motoru je 400 g. Průměr hřídele je 5 mm a délka je 24 mm. Tyto motory byly voleny tak, aby byly schopny pohybovat s laserovou hlavou rychlostí až  $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Tyto rychlosti jsou nejčastěji používané při gravírování. Při vyšších rychlostech dochází k rapidní ztrátě kroutícího momentu.

Tab. 5.1 Parametry krokového motoru Nema 17

Krokový motor Nema 17	
<b>Označení</b>	17HS19-2004S1
<b>Typ motoru</b>	Biloparní
<b>Úhel kroku</b>	$1,8^\circ$
<b>Kroutící moment</b>	0,59 Nm
<b>Proud</b>	2,0 A
<b>Napětí</b>	3,36 V
<b>Fázový odpor</b>	$1,4 \Omega$
<b>Indukčnost</b>	$3,0 \text{ mH} \pm 20 \% (1\text{KHz})$

#### Krokový motor Nema 23

Na osu Z je umístěn krokový motor s označením 23HP30-2804S od firmy Stepperonline. Úhel jednoho kroku je  $1,8^\circ$  a to s přesností 5 %. Motor 23HP30-2804S dosahuje kroutícího momentu 1,9 N.m. Odebíraný proud je 2,8 A, pracovní napětí 12-24 V. Hmotnost tohoto motoru je 1,2 kg. Průměr hřídele je 6,35 mm a délka je 21 mm. Tento

krokový motor byl volen pro polohování pracovního stolu. Z důvodu předpokladu řezání a gravírování velkoobjemových materiálů bylo nutné zvolit dostatečně silný motor, aby byl schopný pohybovat s materiály o vysoké hmotnosti.

Tab. 5.2 Parametry krokového motoru Nema 23

Krokový motor Nema 23	
<b>Označení</b>	23HS30-3004S
<b>Typ motoru</b>	Biloparní
<b>Úhel kroku</b>	1,8°
<b>Kroutící moment</b>	1,9 Nm
<b>Proud</b>	3,0 A
<b>Napětí</b>	3,36 V
<b>Fázový odpor</b>	1,12 Ω
<b>Indukčnost</b>	4,8 mH ± 20 % (1KHz)

#### 5.4.5 Ovládací panel

Ovládací panel laserového stroje je navržen tak, aby byl při práci dobře přístupný a přehledný, viz obr. 53. Panel se nachází na horní straně stroje. Je tvořen hliníkovým plechem, do kterého byly předvrtány a vyřezány díry pro umístění všech potřebných prvků řídicího panelu. Do panelu je umístěn ovladač s displejem řídicí jednotky, ampérmetr měřící proud, který je vpouštěn do laserové trubice, 2 dvoupolohové přepínače určené pro ovládání osvětlení pracovní plochy a red dotu, 3 dvoupolohové přepínače s bezpečnostní krytkou, které slouží pro ovládání proudu dvou 24 V zdrojů a zdroje pro laserovou trubici a bezpečnostního vypínače, který rozepne obvod při nebezpečí. Rozložení přepínačů a ovládacích prvků bylo navrženo podle četnosti jejich využívání. To znamená, že nejbližší k uživateli je ovladač od řídicího systému, ampérmetr pro průběžnou kontrolu proudu procházející trubicí a přepínače osvětlení a red dotu.



Obr. 53 Ovládací panel.

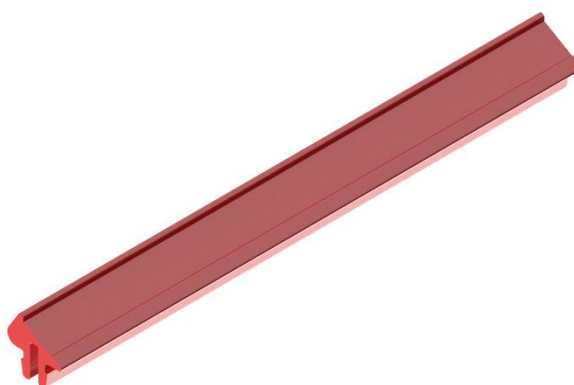
#### 5.4.6 Osvětlení

Osvětlení bylo do stroje zahrnuto pro zajištění bezpečnosti při práci se strojem. Na realizaci osvětlení pracovního prostoru byl zvolen 24 V LED pásek. Rozhodující pro tuto volbu bylo, že se ve stroji nachází mnoho spotřebičů s napětím 24 V, a proto je tedy jednodušší použít pro napájení již použité zdroje napětí. Tento pásek je již od výrobce chráněn voděodolným silikonovým krytem. Pásek byl rozstříhán na pět částí a následně spojen pomocí pájky a kabelů. Osvětlení bylo instalováno do speciálně navržených držáků, které jsou přichyceny v drážkách hliníkového profilu, viz obr. 54. Pásek byl přilepen do držáků pomocí tavné pistole a oboustranné lepicí pásky.



Obr. 54 Osvětlení pracovního prostoru.

Pro uchycení LED pásku byly vymodelovány a vyrobeny pomocí 3D tisku úchyty, viz obr. 55. Ty jsou uzpůsobeny k jeho snadnému uchycení ke konstrukci. Pro výrobu byl zvolen materiál PETG. Držák má sklon 30°, aby dopadalo co nejvíce světelného paprsku na pracovní plochu.



Obr. 55 Držák LED osvětlení.

#### 5.4.7 Kabelový systém

Na propojení hardwaru bylo nutné natáhnout 50 m kabelového systému. Spojení kabeláže bylo provedeno pomocí měkkých pájek. Na pájení byla použita pájka SW24-3 s chemickým složením Sn60Pb40 a pájecí stanice KSGER T12. Jako tavidlo byla použita kalafuna. Všechny spoje byly izolovány pomocí tepelně smrštitelných pásek. Pro propojení

spínačů a přívodních zásuvek byly na kabely zalisovány GPH rychlospojky s izolací. Kabely vedené volně po stroji byly uloženy do PVC chráničkami kabelů Monoflex EN 320 N. Pro uchycení chrániček kabelů k rámu byly navrženy upínky, které byly vyrobeny z PETG materiálu pomocí 3D tiskárny. Pro vedení kabelů v pohyblivých osách X a Y byly použity energetické řetězy. Na obrázku 56 je znázorněna spodní část řídicího panelu s uložením kabelového systému.

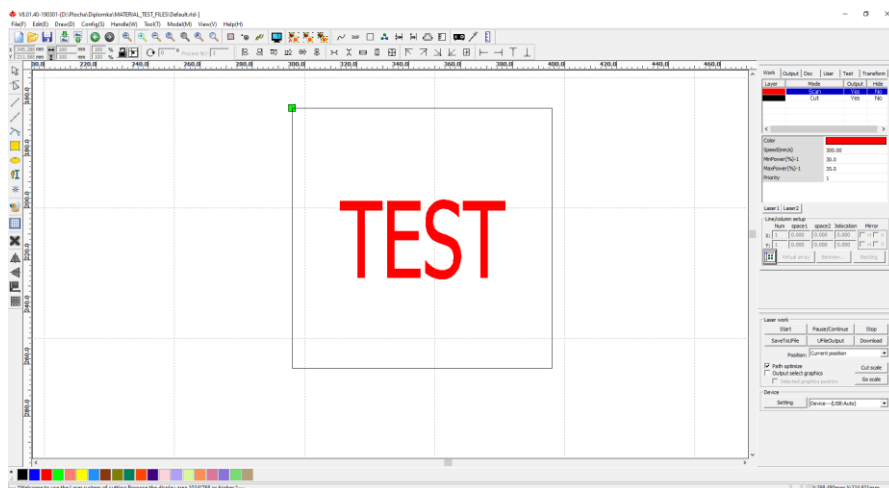


Obr. 56 Vedení kabelového systému.

## 5.5 Software

### 5.5.1 RDWorksV8

Tento software slouží pro vytváření CNC programu pro řídicí systém Ruida RDC6445G od firmy Cloudray. Tento program slouží pro efektivní kontrolu dokončování zpracovaných úkolů podle různých požadavků uživatele. Jednotlivým čarám jsou přiřazeny uživatelem hladiny s různými řeznými parametry, kterými jsou řezné rychlosti nebo výkon laseru. RDWorksV8 podporuje vektorové formáty, jež jsou například dxf, ai, plt, dsb a etc i bitmapové formáty, které jsou bmp, jpg, gif, png a mng. Tento software není náročný na požadavky výpočetní techniky. Na obrázku 57 je znázorněno prostředí počítačového programu RDWorksV8.





Obr. 57 Pracovní prostředí softwaru RDWorksV8.

### 5.5.2 CorelDraw

CorelDraw je profesionálním softwarem pro tvorbu profesionálních grafických návrhů. Je navržen k úpravám dvourozměrných obrazů, jako jsou loga či plakáty. Jedná se o nástroj pro editování vektorové grafiky, který byl vyvinut společností Corel Corporation.

CorelDraw je kompatibilní se softwarem RDWorksV8. Tento plugin se nazývá RDPlug. Jedná se o modul, který je nainstalován přímo do softwaru CorelDraw. Dále je kompatibilní s počítačovým programem AutoCAD nebo také Cadian.

### 5.6 Chlazení

Při řezání pomocí CO<sub>2</sub> laseru dochází k zahřívání skleněné trubice. Proto je nutné vodní chlazení, které udržuje trubici při bezpečné teplotě, jež se pohybuje v rozmezí od 18 °C do 24 °C. Tuto teplotu je potřeba dodržovat, aby nedošlo poškození trubice.

Pro chlazení navrženého CO<sub>2</sub> laserového stroje byl vyroben vodní výměník tepla. Základním prvkem vodního chlazení byly dva počítačové radiátory o rozměru 118 × 270 × 30 mm. Každý radiátor obsahuje dva 12V větráky o průměru 120 mm. Pro tuto chladicí sestavu byl navržen rámeček. Ten bylo nutné rozdělit na 4 kusy, aby ho bylo možné vyrobit z PETG materiálu pomocí 3D tiskárny. Rámečky se skládaly z vytisknutého těla hliníkových mřížek určených na zakrytí ventilátorů.

Do chladicího systému byl umístěn 5 l zásobník vody. Pro cirkulaci chladicího média bylo zvoleno čerpadlo typu P2450 od firmy Cloudray. To má výkon 50 W, průtok 13 l min<sup>-1</sup> a tlak poháněné tekutiny 1,24 bar. Pro propojení chladicího obvodu byly použity silikonové hadice o vnitřním průměru 8 mm. Dále byl do obvodu zapojen průtokový senzor tekutiny HT-30 protect od firmy Cloudray, který slouží jako pojistka při přerušení cirkulace. Do obvodu byly umístěny i dva teploměry, jeden průtokový a druhý v zásobníku chladiva. Pro napájení všech elektronických součástí byl do systému umístěn 24V zdroj a dva regulátory na snížení napětí na 5 V a 12 V. Do obvodu vody byl zapojen průtokový ventil, který slouží jako bezpečnostní pojistka proti poškození laseru. Ventil neumožní spuštění laseru před aktivací chlazení.

Z důvodu prototypové výroby výměníku tepla byla pro uložení elektroinstalace a základních prvků rozvodů chladiva navržena konstrukce realizovaná z protiskluzové březové překližky, která byla použita na podstavu stroje. Do jednotlivých stěn byly vyřezány otvory pro teploměry, hadice a přívodní kabel.

V případě sériové výroby chladicího systému by byla konstrukce řešena ze svařených ocelových profilů. Zakrytování by bylo řešeno z hliníkových plechů, které jsou dobře zpracovatelné. Na obrázku 58 je vyobrazeno vyrobené vodní chlazení laserové trubice.



Obr. 58 Vyrobené prototypové vodní chlazení.

### 5.7 Odsávání

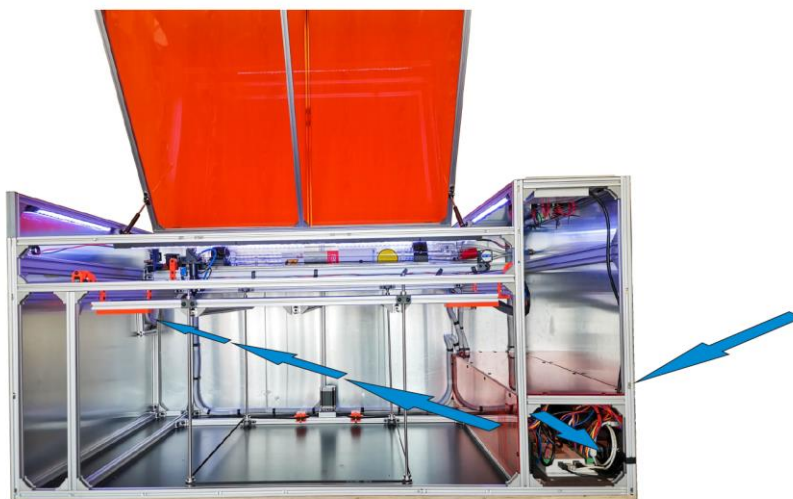
Z důvodu vzniku zplodin při řezání či gravírování je nutné odvádět je z pracovního prostoru. Jestliže je jejich koncentrace vysoká, dochází k nežádoucímu lámání paprsku laseru, které má za následek zvýšení množství nedokonalostí v řezu nebo při gravírování.

Pro odsávání byl zakoupen průmyslový ventilátor s označením OBR 200M od firmy Uzman Versand UG & Co. KG, viz obr. 59. Motor, který ventilátor pohání, má výkon 290 W generuje maximální průtok vzduchu až  $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Průtok vzduchu je plně regulovatelný pomocí ovladače dodávaného od výrobce. Celková váha odsávacího systému je 9,1 kg a má rozměry  $330 \times 290 \times 325 \text{ mm}$ . Pro vstupní a výstupní hadici byla uzpůsobena konstrukce pomocí příruby o průměru 125 mm, PVC redukce z průměru 150 mm na 125 mm a PVC 90° kolenem o průměru 125 mm. Pro propojení ventilátoru se strojem byla použita flexibilní aluminiová hadice o průměru 127 mm a délce 10 m. Všechny použité příruby a redukce byly vyrobeny firmou Dalap.



Obr. 59 Průmyslový ventilátor OBR 200M.

Primárním úkolem ventilátoru je, aby byl schopen odsávat zplodiny z pracovního prostoru. Sekundárním úkolem je chlazení řídicí skříň. Čistý vzduch je nasáván mřížkou přes řídicí skříň. Odtud vchází do pracovního prostoru a je dále i se zplodinami odčerpáván z pracovního prostoru. Cesta odsávaného vzduchu je znázorněna na obrázku 60.



Obr. 60 Cesta vzduchu při odsávání.

### 5.8 Asistenční plyn

U nízkovýkonných laserů není nepoužíván asistenční plyn pro ochranu řezného místa nebo pro podporování hoření. Zde je asistenční plyn určen pro ochranu čočky v laserové hlavici, k okamžitému odvodu zplodin z místa řezu a ke vzniku podtlaku v laserové hlavici. Jako asistenční plyn je zde využíván atmosférický vzduch. Pro vhánění plynu byl použit univerzální elektromagnetický pístový kompresor Hailea ACO 300A (viz obr. 61), který je určen pro nepřetržitý provoz. Výkon kompresoru je  $240 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  o maximálním tlaku  $0,040 \text{ MPa}$ . Pro propojení kompresoru a laserové hlavice byly použity rychlospojky různých druhů a pneumatická hadice o vnitřním průměru  $4 \text{ mm}$  a vnějším průměru  $6 \text{ mm}$ .

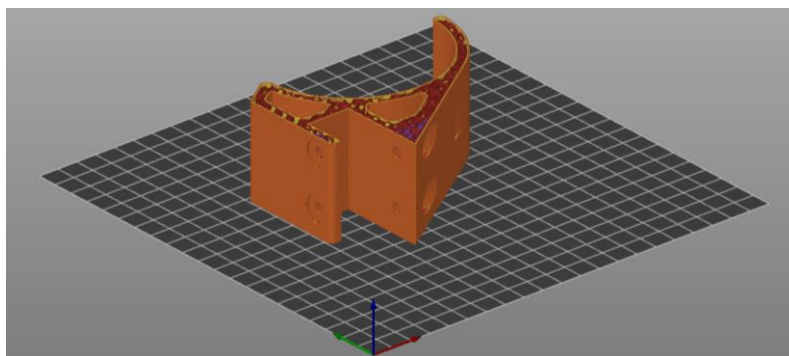


Obr. 61 Kompresor Hailea ACO 300A.

## 6 VÝROBA NAVRŽENÝCH DÍLŮ POMOCÍ FDM TECHNOLOGIE

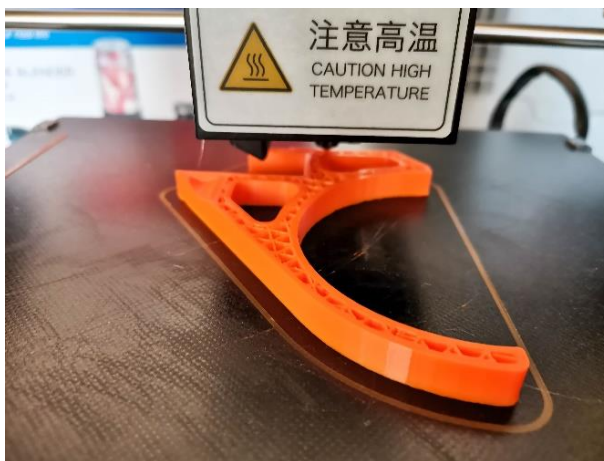
Pro výrobu navržených dílů byla vybrána FDM technologie 3D tisku. Důvodem této volby je (ve srovnání s jinými technologiemi) její nízká výrobní cena. Pro výrobu byla zvolena FDM 3D tiskárna Anycubic Mega S.

Pro výrobu všech dílů byla zvolena tisková struna od firmy Prusa research PETG 1,75 mm. Vytvořené 3D modely byly navrženy v softwaru SolidWorks, Inventor Autodesk a exportovány ve formátu STL. Modely byly nahrány do počítačového programu PrusaSlicer, ve kterém byly nastaveny základní parametry tisku. Všechny díly měly totožné nastavení. Výška vrstvy byla nastavena na 0,15 mm, hustota výplně na 15 % a tvar gyroid. Z důvodu velké smrštivosti materiálu při chladnutí byl aktivován límec. Podpěry byly nastaveny pouze u dílů, u kterých to bylo nutné. Jedná se o napínák řemenu v ose Z a držáky LED osvětlení. Rychlost tisku byla nastavena na hodnotu od  $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  pro tisk malých perimetrů, na  $180 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  pro rychloposuv. Teplota extruderu (tiskové trysky) byla nastavena na teplotu  $240 \text{ }^\circ\text{C}$  a teplota hodbedu (tisková podložka) na hodnotu  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Na obrázku 64 je znázorněn průběh tvorby Gcodu v programu PrusaSlicer.



Obr. 64 Generování Gcodu držáku trubice v programu PrusaSlicer.

Vygenerovaný Gcode byl umístěn na SD kartu, která byla následně vložena do 3D tiskárny. Před tiskem byla 3D tiskárna připravena k tisku. Tryska a podložka byla přehřátá na požadovanou teplotu. Na podložku bylo nutné nanést vrstvu lepidla kvůli tepelné smrštivosti dílu při chladnutí tisku. Hotové a vychladlé díly bylo nutné povrchově upravit. Všechny byly zbaveny otřepů pomocí skalpelu a zbrušeny pomocí brusného papíru s hrubostí 600. Také bylo nutné odstranit podpory a převrtat všechny otvory pomocí vrtáků. Na obrázku 65 je znázorněn průběh tisku.

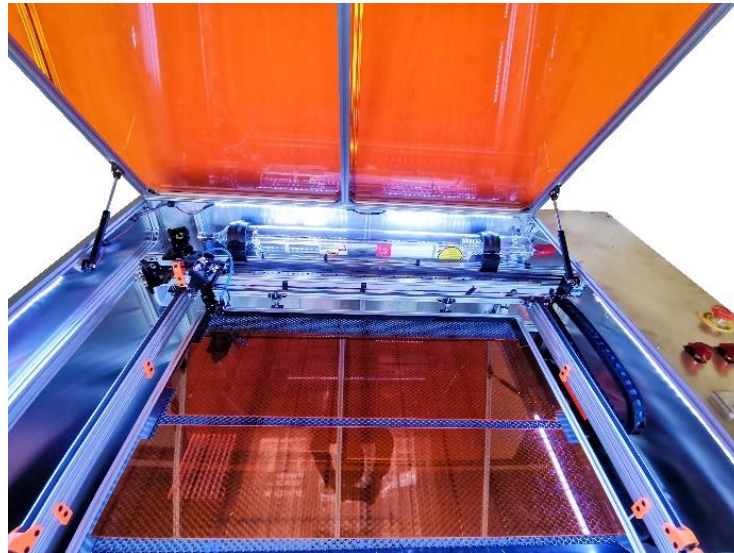


Obr. 65 Průběh tisku FDM technologií.

## 7 VÝROBA NAVRŽENÝCH DÍLŮ POMOCÍ CO<sub>2</sub> LASERU

Pro dělení krycího plexiskla bylo zvoleno řezání pomocí CO<sub>2</sub> laseru. Důvodem použití této technologie byly atypické rozměry zakrytování elektroniky. Pro řezání byl zvolen stávající CNC laserový stroj.

Pro zakrytování bylo zvoleno oranžové průhledné plexisklo Perspex Amber 300 o tloušťce 3 mm. Tento materiál je vhodný pro řezání CO<sub>2</sub> laserem. Desky jsou umístěny na pracovní stůl a zarovnány podle hrany stolu tak, aby byly položeny do nulového bodu stroje. Před řezáním bylo nutné vytvořit 2D geometrii, podle které byl vytvořen program pro zhotovení řezu. Tato geometrie byla vytvořena v počítačovém programu CorelDraw a následně byly nastaveny řezné podmínky pomocí RDworksV8. Pro řezání byl nastaven výkon laseru na 65 % z 80 W, což odpovídá hodnotě 52 W. Dále byla nastavena rychlost posuvu na 20 mm·s<sup>-1</sup>. Vzdálenost řezací hlavy od obrobku byla nastavena na vzdálenost 4 mm. S těmito podmínkami byly vyřezány všechny prvky a otvory. Vygenerovaný program pro řezání s příponou \*.dr byl převeden do stroje pomocí flash disku. Na obrázku 66 jsou znázorněny zhotovené kryty řídicí skříně.



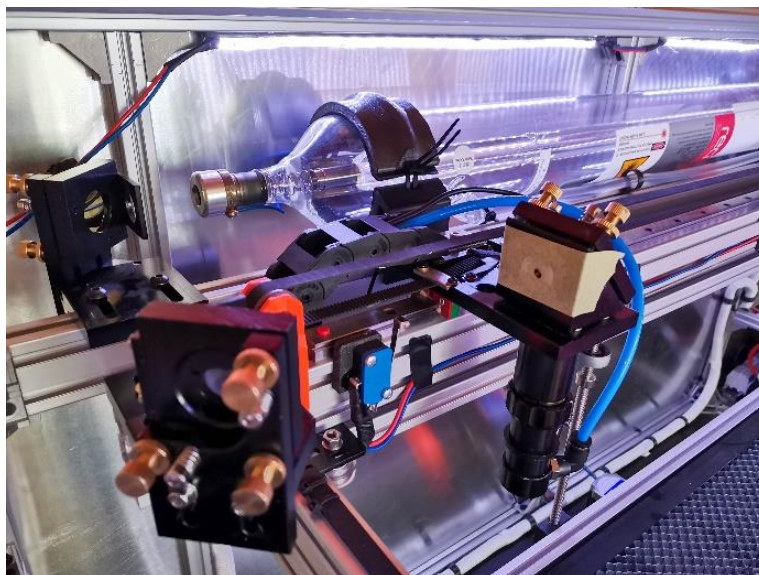
Obr. 66 Zhotovené kryty řídicí skříně v pracovním prostoru laserového stroje.

## 8 TESTOVÁNÍ A ODLADĚNÍ STROJE

Po sestavení stroje ho bylo nutné odladit a otestovat, zda je laserový stroj funkční a konkurenceschopný. Nejprve byl seřízen optický systém pro přenos generovaného laseru z trubice do řezací trysky. Dále byla testována optimální vzdálenost trysky od obrobku, kde je řez nejstálejší a kde má největší výkon. Další testy provedené pro hodnocení stroje byly: rozměrová přesnost řezaných dílů, kolmost osového systému, odladění softwaru pro přesné gravírování a testování řezných podmínek pro materiály různých tvrdostí a tloušťek.

### 8.1 Seřízení optické cesty

Laserový paprsek je veden ze skleněné trubice do řezací hlavy pomocí 3 zrcadel. Ten je veden v rovině XY pomocí zrcadel A a B, viz obr. 26. Pomocí zrcadla v laserové hlavici je paprsek směřován v ose Z tak, aby byl kolmo k pracovnímu stolu. Pro správnou pozici jednotlivých zrcadel byly použity polohovací šrouby, které jsou na držácích zrcadel. Hlavní podmínkou při kalibraci umístění zrcadel je, aby laser směřoval na střed zrcadla. Pro zajištění přesného středu byla použita malířská papírová páska, do které byl vstřelován laserový paprsek nízkého výkonu. Tento postup byl zopakován u všech zrcadel optického systému, viz obr. 67.

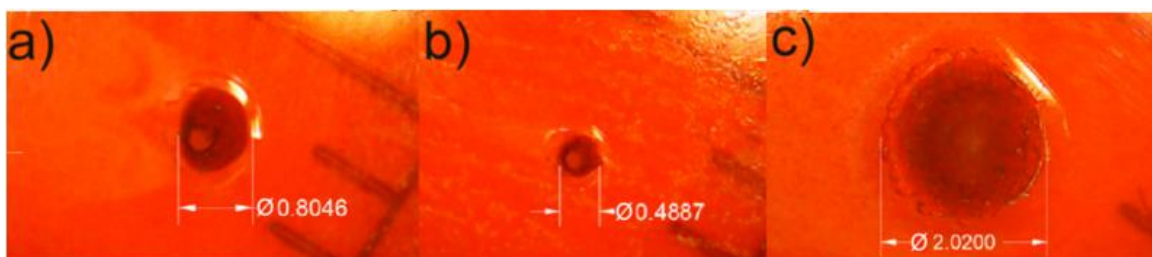


Obr. 67. Kalibrace optické cesty.

### 8.2 Testování optimální vzdálenosti laseru od obrobku

Před samotným procesem řezání bylo nutné zjistit optimální vzdálenost laseru od obrobku. Ve své podstatě je hledána ohnisková vzdálenost, kde se paprsek schází do jednoho bodu. V této vzdálenosti bude laser stálý a bude mít největší průraznost materiálu. To znamená, že laser má největší výkon, když všechny fotony směřují do jednoho bodu. Toto ohnisko vzniká díky meniskové čočce. Ta láme a směřuje paprsek laseru do ohniska.

Test probíhal tak, že bylo vyřezáno několik bodů s různou fokusační vzdáleností od 1 mm do 19 mm s rozstupem 1 mm. Všechny naměřené hodnoty byly zaneseny do tabulky č. 8.1. Laser byl nastaven na výkon 15 % a čas buzení laserového paprsku na 0,5 s. Tento test byl realizován do plexiskla Amber 300 o síle 3 mm. Pomocí digitální lupy DM4 se zvětšením 1000:1 pak byly zhodnoceny jednotlivé řezy. Na obrázku 68 jsou znázorněny 3 testovací řezy s různou vzdáleností laserové hlavy od obrobku.

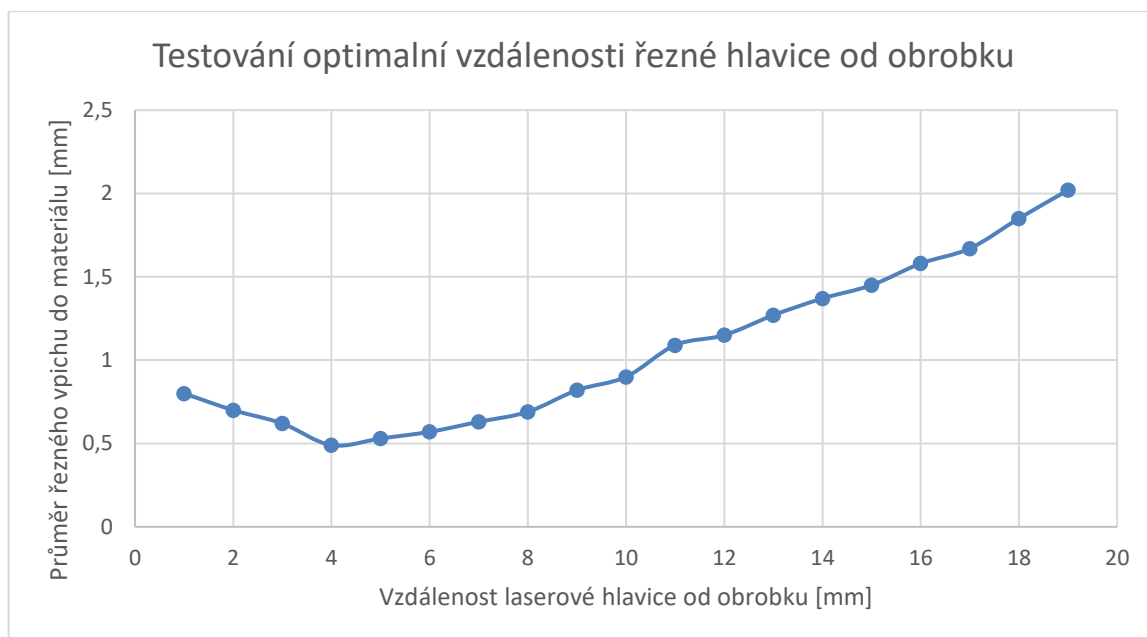


Legenda: a) vzdálenost 1 mm, b) vzdálenost 4 mm, c) vzdálenost 19 mm  
Obr. 68. 3 testovací řezy závislé na vzdálenosti obrobku od laserové hlavy.

Pro znázornění byly vybrány dva extrémy a naměřený nejmenší průměr průřezu. Ve vzdálenosti 1 mm můžeme pozorovat nestálý průměr při řezání. To značilo, že zvolená vzdálenost byla nízká. Sice došlo k proříznutí materiálu, ale řez měl kuželovitý tvar. To je nežádoucí, protože laserový paprsek ztrácí při řezání výkon. Řez ve vzdálenosti 1 mm je vyobrazen na obrázku 68 a). Druhým testovaným extrémem byla vzdálenost 19 mm. V této vzdálenosti nedošlo k proříznutí materiálu skrz. Jak je vidět na obrázku 68 c), laser ztrácí velké množství výkonu. Průměr otvoru je přibližně 4x větší než průměr otvoru při optimální vzdálenosti. Zjištěnou optimální vzdáleností laserové hlavy od obrobku jsou 4 mm. Na obrázku 68 b) je vyobrazen řez při testování vzdálenosti 4 mm, při které vznikl průnik materiálem o průměru 0,5 mm. Řez je v této vzdálenosti stálý a koncentrovaný do jednoho bodu. U této vzdálenosti došlo k proříznutí skrz materiál. Na obrázku 69 jsou do grafu zaneseny naměřené hodnoty zjištěné po provedení testu.

Tab. 8.1 Naměřené hodnoty při hledání ohniskové vzdálenosti s krokem 1 mm.

<b>Vzdálenost [mm]</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Průměr [mm]</b>	0,8	0,7	0,62	0,49	0,53	0,57	0,63	0,69	0,82	0,9
<b>Vzdálenost [mm]</b>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	-
<b>Průměr [mm]</b>	1,09	1,15	1,27	1,37	1,45	1,58	1,67	1,85	2,02	-



Obr. 69 Graf naměřených průměrů při zjišťování ohniskové vzdálenosti.

Po zjištění ohniska pro řezání bylo provedeno další testování s měřením. Pro měření byla zvolena vzdálenost obrobku od laserové trysky od 3 mm do 5 mm s krokem 0,1 mm. Při tomto měření bylo hledáno ohnisko s přesností 0,1 mm. Pro hodnocení výsledků měření byl měřen průměr a hloubka průrazu. Pro testování byl zvolen PMMA kvádr s tloušťkou 31 mm. Pro testování byl zvolen výkon laseru 30 % a čas buzení 0,5 s.

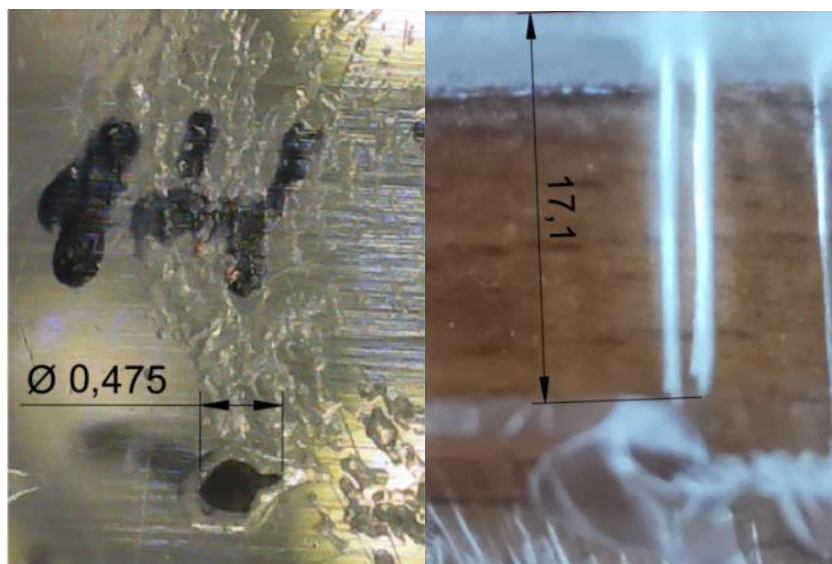
Tab. 8.2 Naměřené hodnoty při hledání ohniska s krokem 0,1 mm.

<b>Vzdálenost [mm]</b>	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4
<b>Průměr [mm]</b>	0,624	0,615	0,605	0,591	0,585	0,531	0,522	0,514	0,502	0,495	0,492
<b>Hloubka průrazu [mm]</b>	15,52	15,55	15,92	16,05	16,20	16,28	16,36	16,42	16,55	16,62	16,74
<b>Vzdálenost [mm]</b>	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5	-
<b>Průměr [mm]</b>	0,484	0,482	0,475	0,478	0,484	0,495	0,512	0,521	0,527	0,534	-
<b>Hloubka průrazu [mm]</b>	16,85	16,92	17,10	16,95	16,82	16,78	16,42	16,11	15,92	15,24	-

Po provedení zkušebních řezů byly změřeny průměry otvoru, které byly vytvořeny laserem, a hloubka proniklého paprsku do materiálu. Při měření byla hledána vzdálenost,



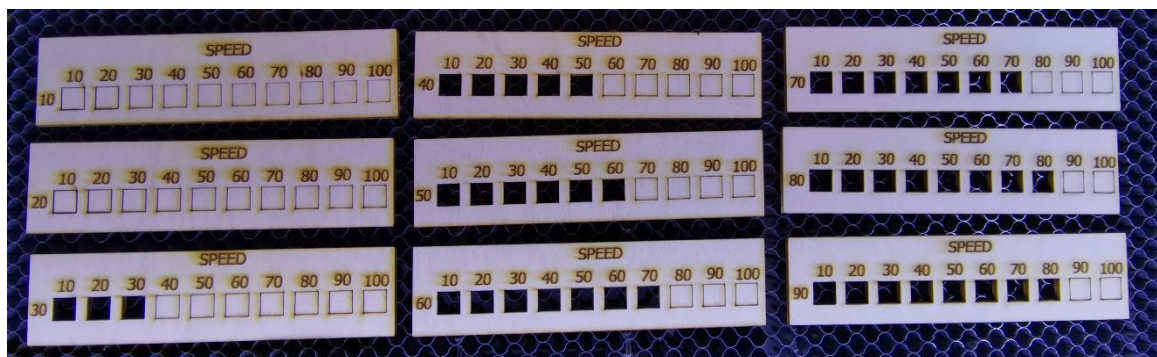
kde bude laser vytvářet nejmenší průměr průřezu a nejhlubší řez. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky 8.2. Z těchto hodnot byla zjištěna ohnisková vzdálenost, měřená od špičky laserové hlavy k polotovaru, která je 4,3 mm. Byl naměřen průměr 0,475 mm a hloubka řezu 17,10 mm, viz obr. 70. Pro měření průměru byla použita digitální lupa DM4 se zvětšením 1000:1 a pro měření hloubky řezu bylo použito digitální posuvové měřidlo s přesností 0,01 mm.



Obr. 70 testovací řez ve vzdálenosti 4,3 mm obrobku od laserové hlavy.

### 8.3 Testování závislosti řezné rychlosti na výkonu laseru při řezání

Pro testování závislosti řezné rychlosti na výkonu byla zvolena MDF březová deska o tloušťce 3 mm a PMMA o tloušťce 3 mm. Pro testování byl vytvořen program s testovacími destičkami. Ten byl nastaven tak, aby při určitém konstantním výkonu měnil v průběhu řezání posuvovou rychlost. Ta byla nastavena od 10 do 100  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$  se změnou 10  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výkon byl testován od 10 % do 90 % výkonu laserové trubice. Na obrázku 71 jsou znázorněny testovací destičky z MDF březové desky.



Obr. 71 Testovací destičky z MDF březové desky.

Pokud budeme vycházet z výzkumu závislosti posuvu na výkonu při řezání a vlivu na drsnost povrchu  $R_a$  v kapitole 2.9, pak je výhodným řešením pro řezání použití maximálního výkonu laseru a upravování posuvové rychlosti. S tímto nastavením je docíleno vysoké

efektivitu práce a struktura řezu má nižší možnou hodnotu  $R_a$ . Z důvodu bezpečnosti a s ohledem na životnost skleněné laserové trubice byl nastaven nejvyšší výkon na 90 % z celkového výkonu laseru. Po vizuální kontrole povrchu řezu všech testovacích destiček byla určena ideální posuvová rychlost v závislosti na řezném výkonu. Pro březovou desku o tloušťce 3 mm bylo stanoveno ideální nastavení pro řezání na hodnoty 90 % výkonu laseru a posuvovou rychlost  $60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při testování PMMA o tloušťce 3 mm bylo zvoleno nastavení 90 % výkonu laseru a posuvová rychlost na hodnotu  $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Na obrázku 72 jsou znázorněny testovací destičky z březové desky a PMMA s ideálním nastavením pro řezání.



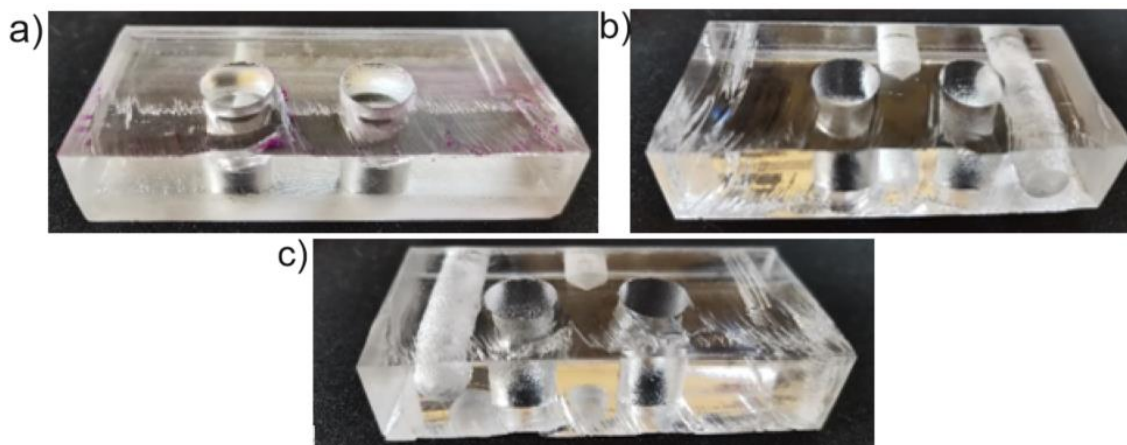
Obr. 72 Testovací destičky z MDF březové desky a PMMA.

Při řezání nového materiálu je nutné provést test závislosti výkonu na posuvové rychlosti. Důvodem je, že každý materiál má jinou odrazivost a schopnost absorbovat laserové záření. Také záleží na objemové hustotě zvoleného materiálu a jeho tloušťce. Schopnost řezat různé materiály je dána výkonem laseru.

#### 8.4 Testování striace povrchu v závislosti na nastavených řezných podmínkách

##### 8.4.1 Test maximální řezivosti na umístění v závislosti na umístění ohniska

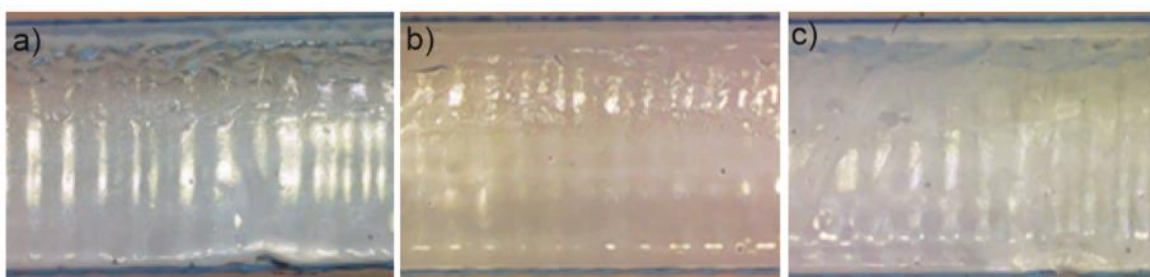
Pro testování striace povrchu byl zvolen PMMA o tloušťce 30 mm. Na tomto materiálu budou názorné a viditelné nedokonalosti v místě řezu. Nastaveny byly základní řezné podmínky na 90 % výkonu laseru a rychlost posuvu na  $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při řezání laserem došlo k roztavení materiálu a v některých případech i k jeho odpaření. Tento materiál je vyfouknut z místa řezu. Striace povrchu je ovlivňována ohniskovou vzdáleností, výkonem laseru, řeznou rychlostí a tlakem vyfukovaného plynu. Nejideálnější nastavením, které bylo zjištěno při testu, je umístění ohniska nejbližší středu řezaného materiálu. Toto nastavení je ideální při řezání materiálů větších tloušťek. Čím výš se ohnisko nacházelo, tím více se projevovala striace. Zároveň bylo zjištěno, že dochází k velké ztrátě výkonu, viz obr. 73.



Obr. 73 a) Umístění ohniska 4 mm pod hranu materiálu, b) Umístění ohniska 2 mm pod hranu materiálu, c) Ohnisko na vrchní hranu materiálu.

#### 8.4.2 Test vlivu umístění ohniska na striaci povrchu

Dalším testovaným parametrem je poloha ohniska, která je závislá na způsobu dělení materiálu. Je zde testováno oxidační, tavné a sublimační řezání, viz obr. 74. Pro testování byl zvolen PMMA o tloušťce 3 mm. Pro řezání byl nastaven výkon trubice na 90 % a rychlosti řezání na  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . U oxidačního řezání je ohnisko umístěno na horní stranu řezaného materiálu. Při tomto typu řezání docházelo ke vzniku hlubokých rýh. U sublimačního řezání bylo ohnisko umístěno na střed řezaného materiálu. Při tomto typu řezání docházelo ke vzniku jemnějších rýh, ale povrch v místě řezu byl kvalitnější a čistší než při oxidačním řezání. U sublimačního řezání, kdy bylo ohnisko umístěno na spodní hranu materiálu, byl řez nejméně postižen striací povrchu. Bylo usouzeno, že pro řezání PMMA je nejvýhodnější použít sublimační řezání.



Obr. 74 a) Oxidační řezání, b) Sublimační řezání c) Tavné řezání.

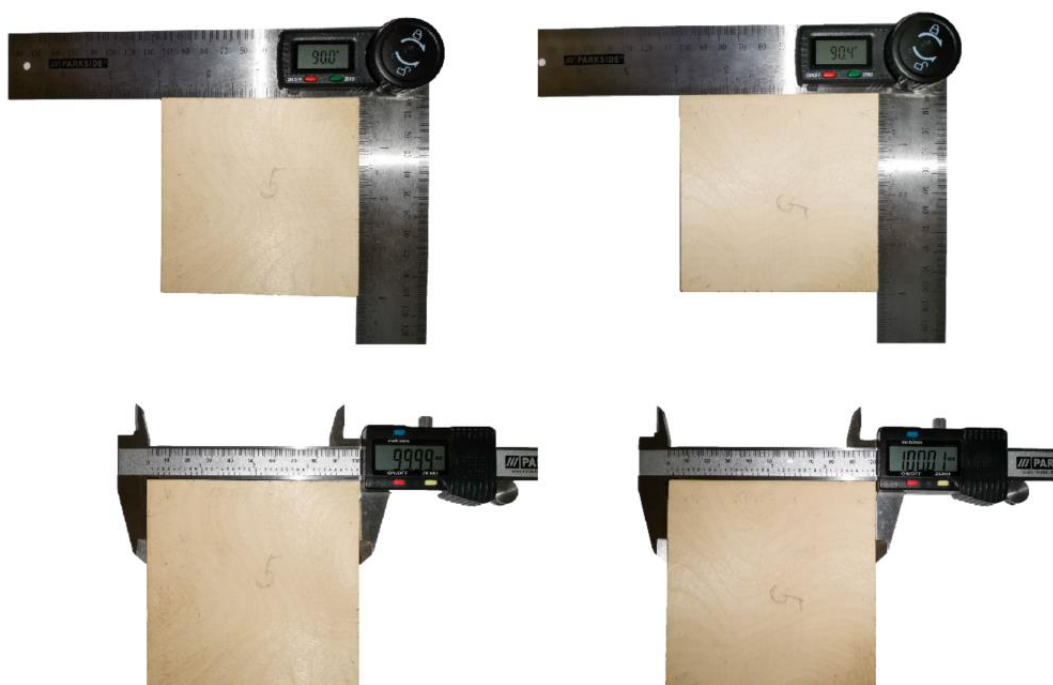
#### 8.5 Testování rozměrové přesnosti a kolmosti při řezání

Při tomto testu byly vyřezávány zkušební destičky o rozměrech  $100 \times 100 \text{ mm}$  z MDF březové desky o tloušťce 3 mm. Řezný posuv byl nastaven na  $60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  a výkon na 90 %. Výsledky jednotlivých testů byly zaznamenány do tabulky 8.3. Kontrolována byla rozměrová přesnost v ose X, v ose Y a kolmost stran. Na měření jednotlivých parametrů bylo použito digitální posuvové měřidlo a digitální úhloměr. Po prvním zkušebním řezání byla provedena kontrola správného předepnutí řemenů. To mělo za následek rapidní zlepšení přesnosti v ose Y. Odchylka v této ose poté byla 0,01 mm. Pro zajištění přesnosti v ose X musela být pozměněna délka kroku, která byla přepočítána pomocí počítačem nastavené vzdálenosti a reálné vzdálenosti. Tomuto parametru se říká délka kroku. Pro zajištění kolmosti os byly dotaženy pojezdové vozíky v ose Y. Po provedení těchto úprav bylo

dosaženo průměrné přesnosti 0,05 mm v ose X a Y. Průměrná odchylka kolmosti je nyní 0,4°. Postup měření je znázorněn na obrázku 75.

Tab. 8.3 Naměřené hodnoty při ladění a testování rozměrové přesnosti.

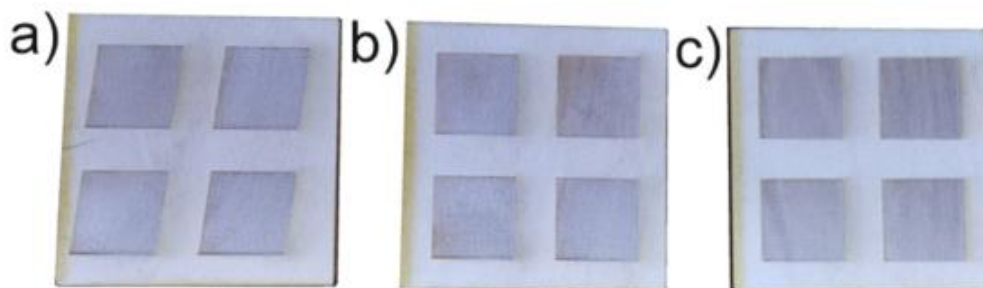
Test	1	2	3	4	5
Osa X [mm]	98,94	99,49	99,51	99,90	99,99
Osa Y [mm]	99,89	99,95	99,95	99,98	100,01
Maximální úhlová odchylka	1,1°	1°	1°	0,7°	0,4°



Obr. 75 Postup měření rozměrové přesnosti.

### 8.6 Ladění a testování přesnosti při gravírování

Pro testování přesnosti při gravírování byl vytvořen 2D model, který tvoří 4 čtverce o délce hrany 20 mm, které byly gravírovány s nastavením rychlosti posuvu  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  a 20 % výkonem. Po prvním testu docházelo ke zkosení hrany. Tento problém byl způsoben ztrátou kroku při každém průchodu trysky, který byl způsoben špatným nastavením pulzu. Oprava proběhla v řídicím softwaru RDworkV8, kde byla upraveno nastavení pulzního kroku. Dále byla testována přesnost gravírování se zápalom při jednostranném zápalu a při oboustranném zápalu. Vizualní kontrola prokázala dostatečnou přesnost u obou variant gravírování, viz obr. 76.



Obr. 76 a) Test gravírování před seřízením pulzu, b) Test jednostranného gravírování po seřízení pulzu, c) Test oboustranného gravírování po seřízení pulzu.

Pro seřízení a testu přesnosti byl vytvořen testovací obdélník o rozměrech  $50 \times 0,2$  mm. Pro testování byly nastaveny řezné podmínky řezná rychlost  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 30 % výkonem laseru, krokem 0,3 mm a pálením z obou stran. Toto nastavení bylo voleno, aby bylo názorné, zda časování zápalu je správně nastaveno. Podle vizuální kontroly zkušební obdélníku bylo zhodnoceno, že nastavení časování je správné, viz obr. 77.



Obr. 77 Test časování laseru při gravírování.

Pro testování ideálního výkonu laseru byl nainportován do softwaru RDworksV8 testovací program, podle kterého bude voleno ideální nastavení pro gravírování do březové překližky o tloušťce 3 mm. Pro gravírování byla zvolena rychlost  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Podle výsledků testu bylo posouzeno, že nejideálnějším výkonem pro gravírování při rychlosti  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  je 25 % výkonu trubice. Při tomto nastavení byla docílena dostatečná míra hloubky v gravírování a okolí místa gravírování nebyla postižena přebytečným opalem, viz obr. 78.



Obr. 78 Testování výkonu pro gravírování při rychlosti  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 9 PŘEDSTAVENÍ STROJE - CO<sub>2</sub> LASER 80 W - GOLIÁŠ

Realizovaný stroj byl pojmenován jako CO<sub>2</sub> Laser 80W-GOLIÁŠ. V této kapitole bude představen realizovaný CNC laserový CO<sub>2</sub> stroj. Výsledné parametry realizovaného stroje byly zapsány do tabulky (9.1) a materiály, které je možné zpracovávat jsou zapsány do tabulky (9.2). Propagační fotografie byly vloženy do tabulky (9.3) Všechny tyto tabulky byly použity na vytvoření propagačního letáku, viz příloha 1.

Tab. 9.1 Parametry realizovaného stroje.

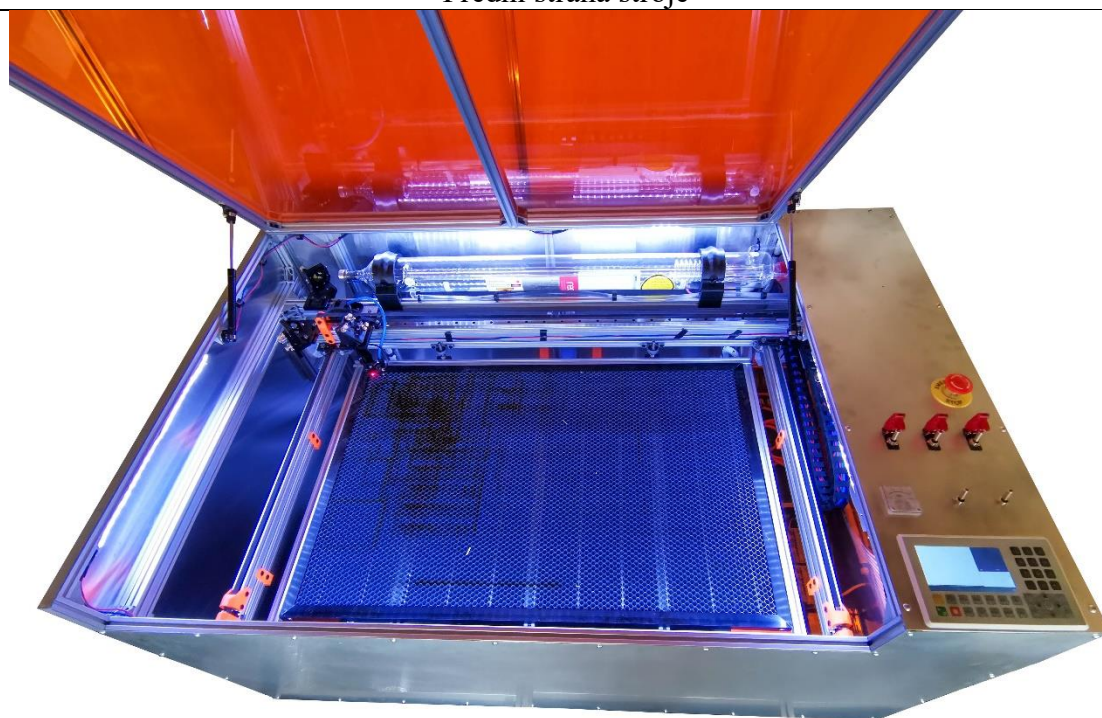
Parametr	Hodnota
Hmotnost	210 kg
Vlnová délka	10,6 μm
Laserový zdroj / trubice	skleněná laserová trubice 80 W
Zdvih pracovního stolu	0 – 350 mm
Ohnisková vzdálenost	53,8 mm
Pracovní plocha	900 × 600 mm
Typ pracovního stolu	deska s otvory ve tvaru plástve
Rotací osa	volitelně
Průchozí stroj	ne
Autofocus	ne
Rychlost řezného posuvu	0 - 300 mm·s <sup>-1</sup>
Přesnost v rovině XY	0,05 mm
Chlazení	vodní
Vnější rozměr	1400 x 895 x 710 mm
Ovládací software	LaserWork
Výkon	80 W

Tab. 9.2 Zpracovatelné materiály.

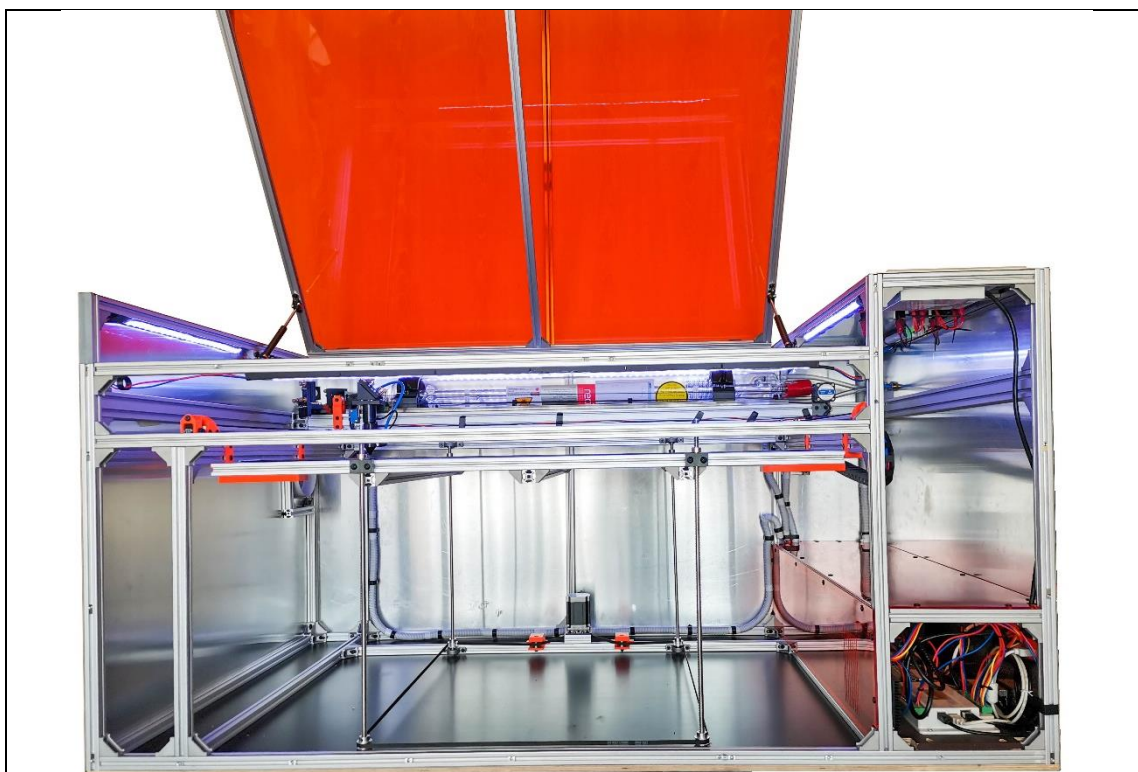
Zpracovatelné materiály	Řezání	Gravírování
Kovový materiál	NE	NE
Kovový materiál s vrchovou úpravou	NE	ANO
Plst' a filc	ANO	ANO
Sklo	NE	ANO
Dřevo, dýha, překližka	ANO	ANO
Lepenka dřevovláknité desky	ANO	ANO
Keramika, porcelán	NE	ANO
Korek	ANO	ANO
Kůže	ANO	ANO
MDF	ANO	ANO
Přírodní kámen, žula, mramor	NE	ANO
Guma, pryž	ANO	ANO
Papír	ANO	ANO
Textil (přírodní i umělý)	ANO	ANO
Akrylátová pryskyřice, PMMA	ANO	ANO
Polyester	ANO	ANO

Tab. 9.3. Fotografie laserového stroje – CNC CO<sub>2</sub> Laser 80W-Goliáš.

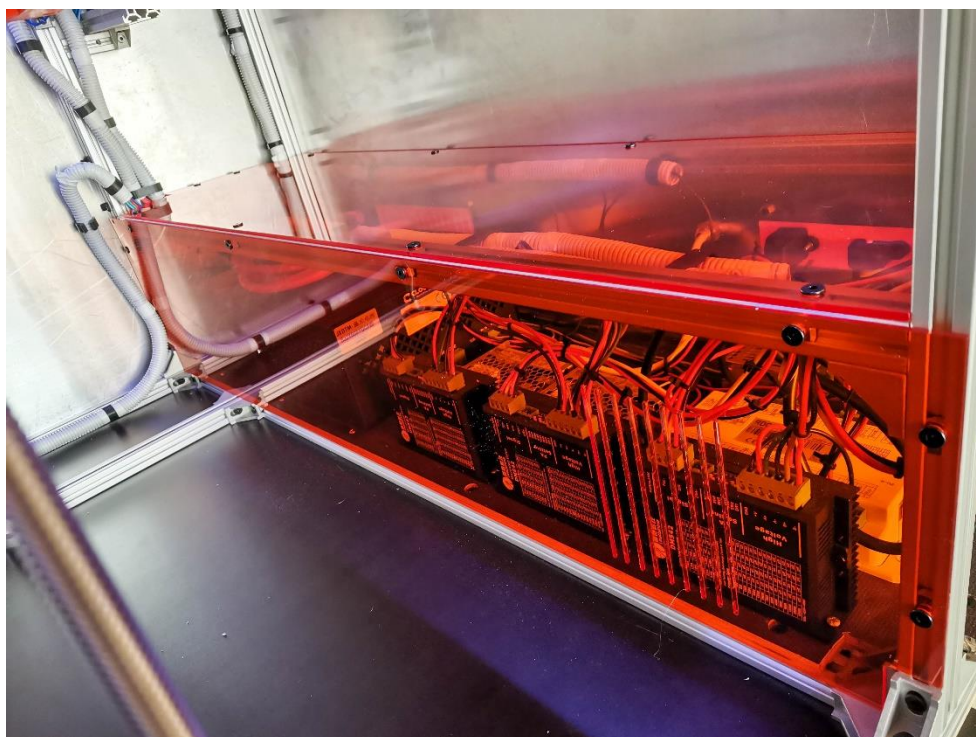
Přední strana stroje



Pracovní prostor a řídicí panel



Vnitřní prostor stroje



Skříň s elektronikou





Pravá bočnice



Levá bočnice

## 10 BEZPEČNOST PRÁCE

### 10.1 Prostředí

CO<sub>2</sub> laserový stroj musí být umístěn do místnosti, která je dobře odvětrávána, aby nedošlo k plicním onemocněním. Prostor musí být temperován na minimální teplotu 17 °C, aby nedošlo k poškození elektroniky a CO<sub>2</sub> laserové trubice. Jelikož je ve stroji umístěn vysokonapěťový zdroj, je nutné, aby prostředí, ve kterém je laser implementován, bylo s co nejmenší vlhkostí a nedošlo poruše elektroniky. Prostor, kde bude stroj umístěn, musí být vybaven protipožárním zabezpečením a také musí být označen varovnými nápisy, viz obr. 79. V okolí stroje se nesmí nacházet žádné hořlavé látky.



Obr. 79 Bezpečnostní značka – Pozor laserové pracoviště [47].

### 10.2 Obsluha

Před samotnou obsluhou stroje musí být všichni pracovníci proškoleni o bezpečnosti práce s CO<sub>2</sub> laserovým strojem. Pracovník musí být vybaven nehořlavým oblečením a ochrannými brýlemi, který jsou vybaveny UV filtrem, aby nedošlo k poškození zraku a popálení kůže pracovníka. Při spuštění stroje je nutné, aby byl poklop důkladně uzavřen a tím byl i pracovní prostor zabezpečen. V pracovním prostoru hrozí popálení laserem nebo také fyzický úraz způsobený pohybem osami stroje.

## 11 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

V této kapitole jsou popsány celkové náklady a vstupní investice pro návrh realizace CNC laserového stroje. Byla zde započítána i hodinová sazba konstruktéra. Do výpočtu nebyly zahrnuty režijní náklady

### 11.1 Náklady na použité nástroje, stroje a měřidla

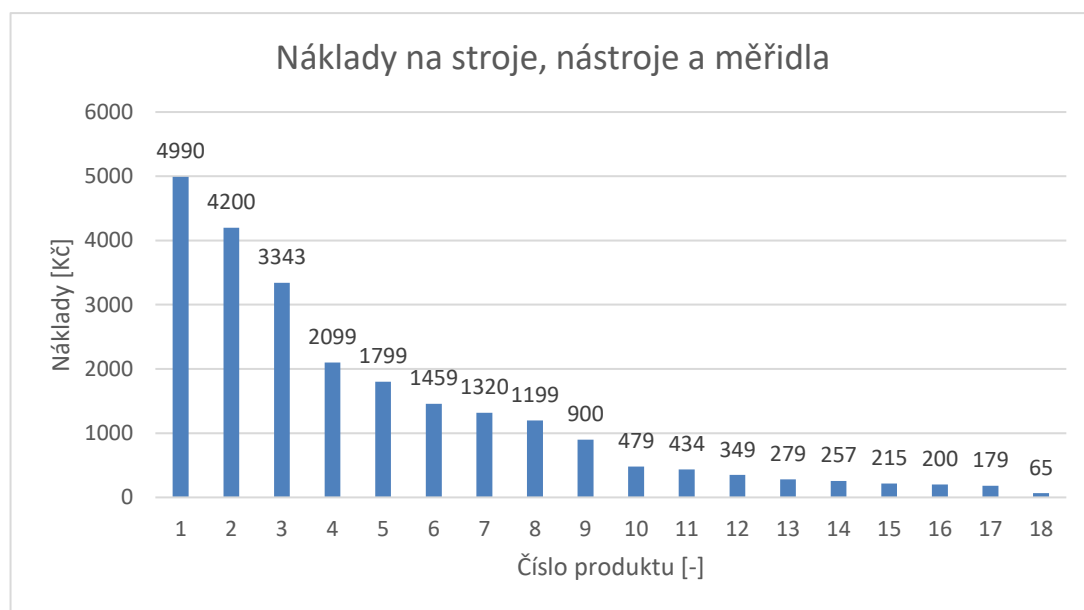
V tabulce (11.1) jsou rozepsány náklady na použité nástroje, stroje a měřidla, které byly použity při výrobě prototypového CNC laserového stroje. Je zde uvedena pořizovací cena jednotlivých elementů. Pro výpočet nákladů pro sériovou výrobu je nutné počítat s životností jednotlivých nástrojů, strojů či měřidel.

U jednotlivých nástrojů a strojů je stanovení životnosti rozdílné. V reálném případě se počítá s tím, že se nástroj poškodí dříve, než je uvedená životnost nástroje od výrobce. To může být způsobeno nesprávným zacházením při užívání, popř. vadou od výrobce. Nebude zde počítáno s náklady nutnými na údržbu strojů a nástrojů a s náklady na cejchování měřidel. Z tohoto důvodu se bude v této diplomové práci počítat pouze s pořizovacími náklady.

Tab. 11.1 Náklady na stroje, nástroje a měřidla.

Číslo	Název produktu	Pořizovací cena [Kč]
1	Sada nářadí AHProfi – AG803105	4 990
2	3D tiskárna - Anycubic Mega S	4 200
3	Oscilační pila Bosch PMF 190 E	3 343
4	Aku kombinované nářadí Parkside 4 v 1 PKGA 20-Li C2	2 099
5	Pokosová pila Parkside PKS 1500 B3	1 799
6	HSS Vrták stupňovitý Ø 5-31 mm	1 459
7	KSGER T12 pájecí stanice	1 320
8	Ruční okružní pila PHSA 20-Li A2	1 199
9	Digitální lupa DM4 1000x 2MP	900
10	Sada vrtáků do kovu Ø 1-13 mm HSS vybrušované	479
11	Sada pilníků MAAGG 080118 5ks	434
12	Digitální měřicí přístroj Powerfir PDM 300 B1	349
13	Digitální posuvné měřidlo PARKSIDE	279
14	Tavná pistole 230V – TO-73060	257
15	Sada vrtáků do dřeva Bosch X-PRO LINE	215
16	Drátová pila	200
17	Truhlářský úhelník hliníkový 300 mm YT-7081	179
18	Důlčík 120 mm – YT-4692	65
<b>Celkem:</b>		<b>23 766,- Kč</b>

Celkové pořizovací náklady strojů, nástrojů a měřidel jsou  $N_1 = 23\,766,-$  Kč. Tuto investici není nutné započítávat do ceny výroby dalších laserových strojů. Graf jednotlivých cenových nákladů za stroje, nástroje a měřidla je znázorněn na obrázku 80.



Obr. 80 Graf jednotlivých cenových nákladů za stroje, nástroje a měřidla.

Podle cen jednotlivých položek lze soudit, že potřebné vybavení bylo pořizováno za co nejnižší ceny, ale přitom v takové kvalitě, aby bylo spolehlivé. Řezné a vrtací stroje byly voleny od německých firem Parkside a Bosch. Nejdražší položkou je zde 3D tiskárna Anycubic Mega S, která je levnou variantou oproti konkurenčním výrobcům 3D tiskáren.

### 11.2 Náklady na potřebné díly, konstrukční materiál a asistenční prvky CO<sub>2</sub> laseru

Všechny použité prvky a jejich ceny byly rozpracovány v tabulce (11.2). Většina použitých dílů a konstrukčních prvků byla pořízena ze zahraničí, a to převážně z Asie. Tito dodavatelé byli zvoleni proto, že nabízí nižší pořizovací ceny oproti domácímu trhu. V některých případech kvalita dílů odpovídala ceně. Do celkové ceny všech potřebných prvků byla přičtena cena za dopravu, clo a daň. Konstrukční materiál byl zakoupen ve větším množství, protože zde bylo počítáno i s odpadním materiálem.

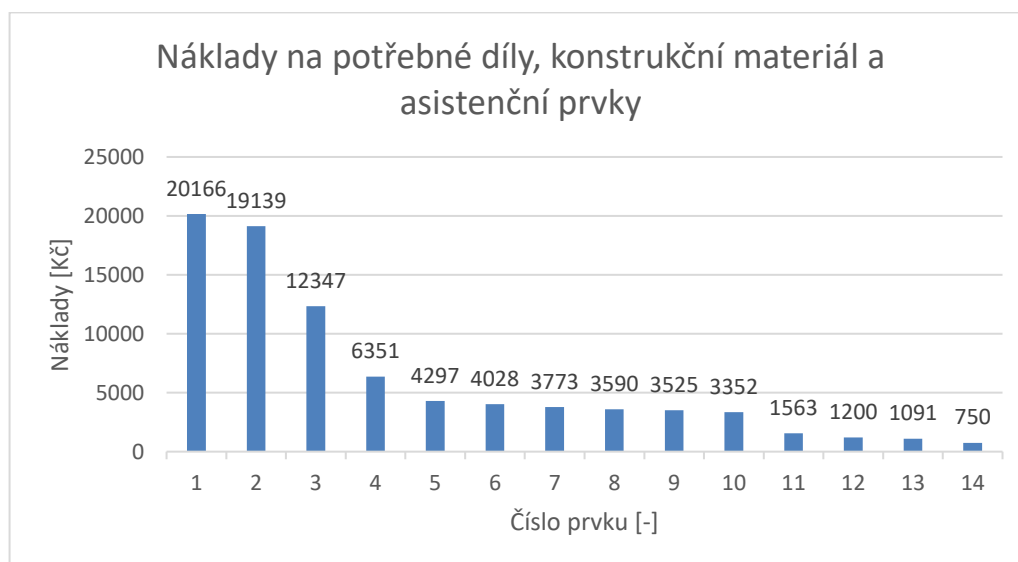
Použitý konstrukční materiál byl pořízen od firmy ASKMT. Ta dodává stavebnicové systémy z hliníkových profilů. Materiál použitý pro výrobu pomocí 3D tisku byl zakoupen od firmy Prusa Research a.s. Všechny typy šroubů, matic a spojovacích prvků byly pořízeny od firem Venstpow, DBIRD Store a Balancedoor Store. Mechanické prvky stroje byly zakoupeny od firmy LINK CNC Store, CNA Mechanical Part, POWGE Store, GKTOOLS, Aokin Electrical Component Store, LINK CNC belt pulley store a STEPPERONLINE Store. Optické prvky a základní prvky laseru byly pořízeny od firmy CloudRay. Prvky elektroinstalace byly zakoupeny od firem Striveday Store, MannHwa Smart Home Electrical, Seven Bears a Elima elektro s.r.o.

Chlazení bylo zkonstruováno ze stejných prvků jako CO<sub>2</sub> laserový stroj. Kompresor ofuku trysky byl zakoupen od firmy Hailea, odsávací přístroj od firmy Uzman Versand UG.

Tab. 11.2 Náklady na potřebné díly, konstrukční materiál a asistenční prvky na výrobu prototypu.

Číslo	Skupina prvků	Požizovací cena [Kč]
1	Hardware a jeho propojení	20 166
2	Laserová trubice a optická cesta	19 139
3	Hliníkové profily	12 347
4	Mechanické prvky a úchyty	6 351
5	Šrouby a matice	4 297
6	Asistenční plyn	4 028
7	Odsávání	3 773
8	Vodní chlazení	3 590
9	Krokové motory	3 525
10	Plexisklo	3 352
11	Hliníkové plechy	1 563
12	OSB deska	1 200
13	Řemeny a řemenice	1 091
14	Filament	750
<b>Celkem:</b>		<b>85 172</b>

Nejdražší položkou z potřebných dílů pro stavbu je laserová skleněná trubice Reci W1. Další výrazně dražší položkou, je řídicí jednotka Ruida. Zbylé díly mají kupní hodnotu v řádu stovek až tisíců korun. Celkové náklady na nákup potřebných dílů, konstrukčního materiálu a asistenčních prvků odpovídají hodnotě  $N_2 = 85\,172$  Kč. Na obrázku 81 je znázorněn graf cenových nákladů za jednotlivé zakoupené prvky.



Obr. 81 Graf jednotlivých cenových nákladů za potřebné díly, konstrukční materiál a asistenční prvky.

### 11.3 Náklady na hodinovou sazbu konstruktéra

Do celkové ceny stroje byla započítána hodinová sazba konstruktéra. Hodinová mzda byla stanovena z průměrné hodnoty hrubé mzdy v roce 2020, jejíž výše činila v České

republiky podle Českého statistického úřadu 35 611 Kč. Z průměrné hodnoty hrubé mzdy byla vypočítána hodinová mzda konstruktéra, která činí 223 Kč po zaokrouhlení. Náklady pro zaměstnavatele jsou značeny jako  $M_{hod} = 223 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$ . Do hodinové mzdy byl započítán celkový hodinový fond, který byl využitý při kompletní stavbě prototypového stroje. [48].

Tab. 11.3 Náklady na konstruktéra.

Operace	Označení	Čas [hod]
Průzkum trhu s CO <sub>2</sub> lasery	t <sub>1</sub>	10
Průzkum trhu s potřebnými díly a materiálem	t <sub>2</sub>	24
Konstrukční návrh	t <sub>3</sub>	120
Nákup potřebných prvků	t <sub>4</sub>	24
Dělení konstrukčních materiálů	t <sub>5</sub>	15
Vrtání	t <sub>6</sub>	4
Montáž konstrukce	t <sub>7</sub>	30
Sestavení osového systému	t <sub>8</sub>	25
Elektroinstalace	t <sub>9</sub>	16
Montáž asistenčního plynu	t <sub>10</sub>	3
Stavba vodního chlazení	t <sub>11</sub>	8
Montáž odsávání	t <sub>12</sub>	3
Montáž zakrytování	t <sub>13</sub>	2
Odladění	t <sub>14</sub>	20
<b>Čas konstruktéra při výrobě prototypu</b>	<b>t<sub>Acelk</sub></b>	<b>304</b>
<b>Čas konstruktéra při kusové výrobě stroje</b>	<b>t<sub>Bcelk</sub></b>	<b>150</b>

Pro výpočet celkového času konstruktéra stráveného při výrobě prototypu byly sečteny všechny časy z tabulky (11.3) podle vzorce (11.1).

$$t_{Acelk} = t_1 + t_2 + \dots + t_{14} = 304 \text{ hod} \quad (11.1)$$

Pro výpočet celkového času konstruktéra stráveného při kusové výrobě stroje nebylo nutné započítat do celkového času čas na průzkum trhu s CO<sub>2</sub> lasery, průzkum trhu s potřebnými díly a materiály a konstrukční návrh. Tento čas byl spočítán podle vzorce (11.2).

$$t_{Bcelk} = t_{Acelk} - (t_1 + t_2 + t_3) = 304 - (10 + 24 + 120) = 150 \text{ hod} \quad (11.2)$$

Pro výpočet nákladů na práci konstruktéra při výrobě prototypu pro zaměstnavatele byly vypočtené hodnoty dosazeny do rovnice (11.3).

$$N_{Acop} = t_{Acelk} \cdot M_{hod} = 304 \cdot 223 = 67\,792 \text{ Kč} \quad (11.3)$$

Celkové hodinové náklady na návrh, sestavení a odladění celého laserového CNC stroje pro zaměstnavatele byly spočítány na hodnotu 67 792 Kč.

Pro výpočet nákladů na práci konstruktéra při kusové výrobě CNC laserového stroje pro zaměstnavatele byly vypočtené hodnoty dosazeny do rovnice (11.4).

$$N_{Bcop} = t_{Bcelk} \cdot M_{hod} = 150 \cdot 223 = 33\,450 \text{ Kč} \quad (11.4)$$

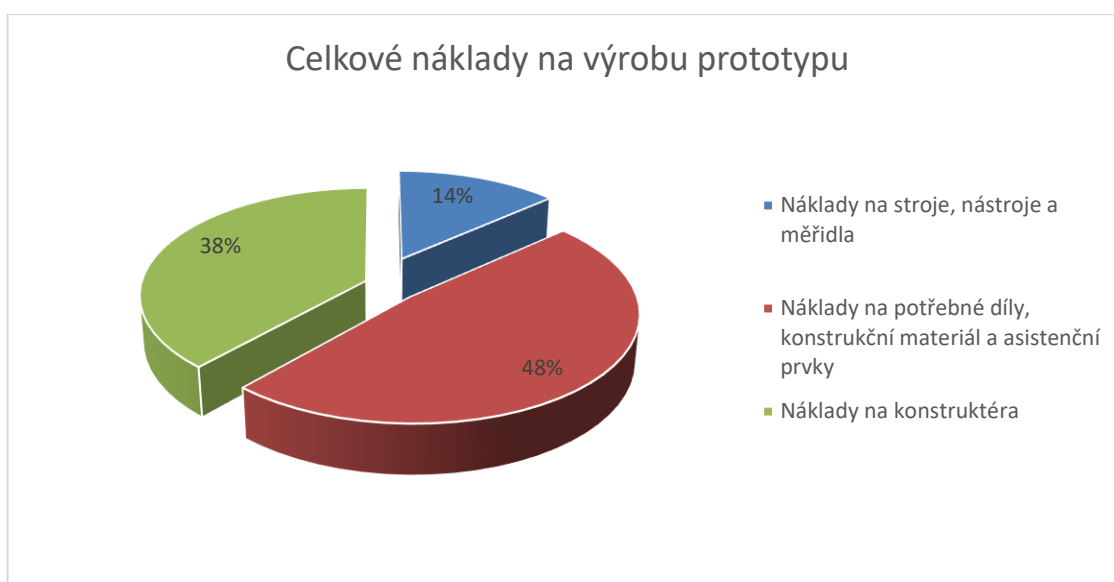
Pro kusovou výrobu stroje se časový font konstruktéra snížil z 304 hodin na 150 hodin. S tímto časem se počítá pro výpočet nákladů zaměstnavatele při kusové výrobě stroje s ohledem na návrat investic. Tato cena odpovídá hodnotě 33 450 Kč.

#### 11.4 Celkové náklady na výrobu prototypového stroje

Pro výpočet celkových nákladů byly sečteny náklady na stroje, nástroje a měřidla, náklady na potřebné díly, konstrukční materiál a asistenční prvky. Pro sečtení veškerých nákladů byl použit vzorec (11.5)

$$N_{Acelk} = N_1 + N_2 + N_{Acop} = 23\,766 + 85\,172 + 67\,792 = 176\,730 \text{ Kč} \quad (11.5)$$

Celkové náklady na výrobu byly spočítány na hodnotu  $N_{celk} = 176\,730,-$  Kč. Všechny vypočítané podíly nákladů byly zaznamenány do grafu, který je znázorněn na obrázku 82.



Obr. 82 Podíl základních skupin nákladů na stavbu CNC laserového stroje.

## 12 NÁVRATNOST INVESTICE

Pro návratnost investice byly uvažovány dvě cesty. První uvažovanou cestou pro návratnost investice je, že CNC řezací stroj bude schopný generovat zisky pomocí zakázkové a kusové výroby. Uvažujeme návratnost do dvou let. Na základě této skutečnosti by bylo nutné vygenerovat zisk  $N_{Acelk} = 176\,760$  Kč za dva roky, což odpovídá měsíční částce  $N_{Aměs}$  7 365 Kč, viz vzorec (12.1).

$$N_{Aměs} = \frac{N_{Acelk}}{24} = \frac{176\,760}{24} = 7\,365 \text{ Kč} \quad (12.1)$$

Do kalkulace je třeba zahrnout celý rok, neboť náklady plynou i nepracovní dny, avšak tržby mohou být realizovány pouze v pracovní dny. Rok má průměrně  $N_{prac} = 251$  pracovních dní (502 dní pracovních pro dva roky), tedy to by odpovídalo v přepočtu na pracovní den čistého zisku, viz vzorec (12.2)

$$N_{Aden} = \frac{N_{Acelk}}{2 \cdot N_{prac}} = \frac{176\,760}{2 \cdot 251} = 352,11 \text{ Kč} \quad (12.2)$$

Při uvažované marži 30 % by pak pro uvažovanou návratnost investice bylo třeba generovat v pracovní dny tržby ve výši 1525,8 Kč. Při uvažování běžné ceny za 1minutu řezu v rozmezí 5 - 15Kč by tato částka odpovídala cca 153 minutám, tedy 2 hodinám a 33 minutám. Tento čas by stroj vydělával pouze na umožnění investice souvisejícími s přímými náklady. Z výpočtu tedy plyne, že při uvažované jednosměnové 8 hodinové pracovní době by zbytek produkce pokryl, jak osobní, tak režijní náklady, včetně potenciálního zisku.

Druhá uvažovaná cesta návratnosti investice je, že navržený CNC laserový stroj bude prodáván jako produkt. Za předpokladu zanechání všech prvků stroje bez úprav pak budou náklady na potřebné díly, konstrukční materiál a asistenční prvky stejné. Náklady na stroje, nástroje a měřidla budou nulové za předpokladu, že nedojde k jejich poškození. Náklady pro zaměstnavatele na hodinovou sazbu konstruktéra byly přepočítány podle vzorce (10.4). Po sečtení těchto dvou hodnot podle vzorce (12.3) byla vypočítána celková investiční částka při kusové výrobě CNC laserového stroje.

$$N_{Bcelk} = N_2 + N_{Bcop} = 85\,172 + 33\,450 = 118\,622 \text{ Kč} \quad (12.3)$$

Předpokládaná prodejní cena stroje je  $N_{prodej} = 225\,000$  Kč. Pro výpočet návratnosti investice je nutné spočítat hrubý zisk, který je spočítán pomocí vzorce (12.4).

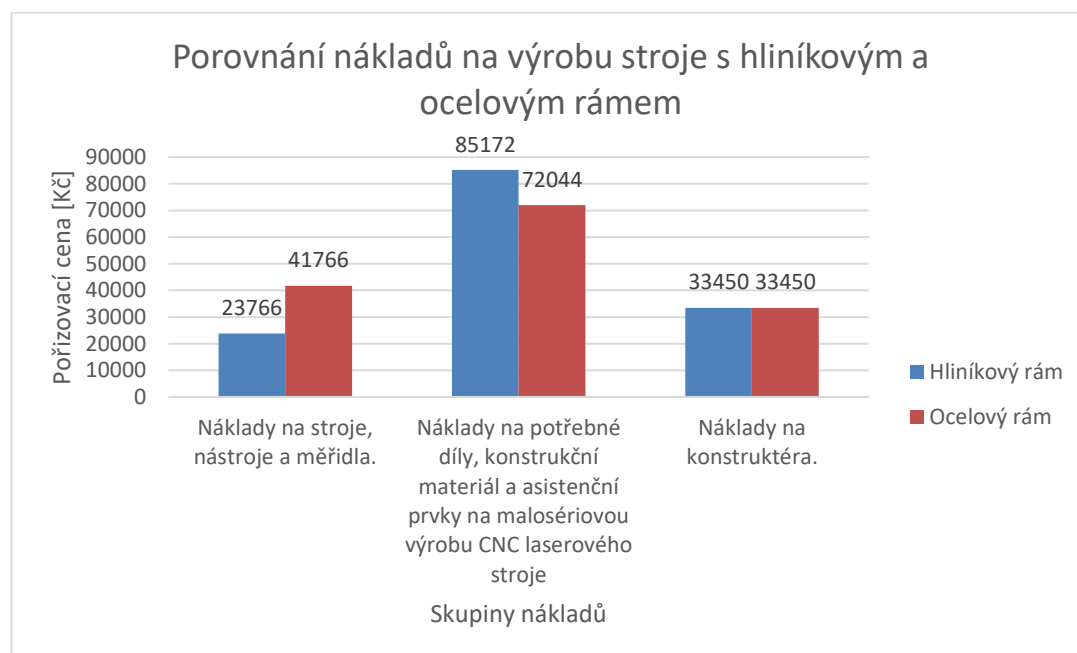
$$N_{zisk} = N_{prodej} - N_{Bcelk} = 225\,000 - 118\,622 = 106\,378 \text{ Kč} \quad (12.4)$$

Pro návratnost počáteční investice by bylo nutné vyrobit a prodat 2 stroje. Výroba těchto laserových strojů bude trvat 300 pracovních hodin, což odpovídá 1,875 měsíce práce při jednosměnném provozu a osmihodinové denní pracovní době.



### 13 POROVNÁNÍ PROTOTYPOVÉ A MALOSÉRIOVÉ VÝROBY STROJE

Při porovnání prototypové a malosériové výroby můžeme zpozorovat mnoho rozdílů, a to jak po finanční stránce, tak po konstrukční. Pro malosériovou výrobu byl pozměněn materiál pro realizaci konstrukce. Hliníkové profily nejsou pro sériovou výrobu používány, protože již není nutné mít rozebíratelné spoje pro rozměrovou korekci konstrukce. Pro malosériovou výrobu byl zvolen ocelový profil 20 × 20 mm s tloušťkou 2 mm z materiálu jakosti S235JR válcovaný za tepla. Tento materiál je finančně přijatelnější. Pro spojování ocelových profilů by bylo použito svařování. Tento spoj je pevnější a zároveň je nerozebíratelný. Tím se zvýší tuhost celé konstrukce, což bude mít vliv na kvalitu gravírování a řezání pomocí CNC laserového stroje. Při tomto upgradu by došlo ke snížení ceny za konstrukční materiál a spojovací materiál. Pro uchycení oplechování by byly použity šrouby a lisovací matice. Je předpokládáno, že svařování a kompletování stroje bude odpovídat stejnému času jako při stavbě prototypu. Jako svářecí stroj by byl zvolen Automig 200 XE a materiál HUATONG HTW 50. Náklady na stroje, nástroje a měřidla se zvedly o 75,7 % na částku 41 766 Kč dle tabulky (11.1) a (13.1). Oproti tomu však byly sníženy náklady na materiál o 15,4 %, což znamená, že na každém jednom stroji je ušetřeno 13 128 Kč dle tabulky (11.2) a (13.2). Na obrázku 83 je znázorněn graf nákladů všech prvků na malosériovou výrobu s potřebným vybavením dílny.



Obr. 83 Porovnání nákladů na stavbu CNC laserového stroje z hliníkového a ocelového rámu.

Tab. 13.1 Náklady na stroje, nástroje a měřidla.

Číslo	Název produktu	Pořizovací cena [Kč]
1	Automig 200 XE	18 000
2	Sada nářadí AHProfi – AG803105	4 990
3	3D tiskárna - Anycubic Mega S	4 200
4	Oscilační pila Bosch PMF 190 E	3 343
5	Aku kombinované nářadí Parkside 4 v 1 PKGA 20-Li C2	2 099
6	Pokosová pila Parkside PKS 1500 B3	1 799
7	HSS Vrták stupňovitý Ø 5-31 mm	1 459
8	KSGER T12 pájecí stanice	1 320
9	Ruční okružní pila PHSA 20-Li A2	1 199
10	Digitální lupa DM4 1000x 2MP	900
11	Sada vrtáků do kovu Ø 1-13 mm HSS vybrušované	479
12	Sada pilníků MAAGG 080118 5ks	434
13	Digitální měřicí přístroj Powerfir PDM 300 B1	349
14	Digitální posuvné měřidlo PARKSIDE	279
15	Tavná pistole 230V – TO-73060	257
16	Sada vrtáků do dřeva Bosch X-PRO LINE	215
17	Drátová pila	200
18	Truhlářský úhelník hliníkový 300 mm YT-7081	179
19	Důlčík 120 mm – YT-4692	65
<b>Celkem:</b>		<b>41 766</b>

Tab. 13.2 Náklady na potřebné díly, konstrukční materiál a asistenční prvky na malosériovou výrobu CNC laserového stroje.

Číslo	Skupina prvků	Pořizovací cena [Kč]
1	Hardware a jeho propojení	20 166
2	Laserová trubice a optická cesta	19 139
3	Mechanické prvky a úchyty	6 351
4	Asistenční plyn	4 028
5	Odsávání	3 773
6	Vodní chlazení	3 590
7	Krokové motory	3 525
8	Plexisklo	3 352
9	Ocelový čtvercový profil 20 x 20 mm	2 016
10	Hliníkové plechy	1 563
11	Šrouby, matice a spojovací materiál	1 500
12	OSB deska	1 200
13	Řemeny a řemenice	1 091
14	Filament	750
<b>Celkem:</b>		<b>85 172</b>

Z dlouhodobého hlediska je varianta se svařovaným ocelovým rámem výhodnější než varianta s rámem z hliníkových profilů, a to z důvodu zlepšení tuhosti rámu a snížení nákladů na výrobu CNC laserového stroje. Náklady na malosériovou výrobu každého jednoho stroje se snížily na částku 105 494 Kč. Rozdíly jednotlivých nákladů pro malosériovou výrobu jsou vyobrazeny v tabulce (13.3).

Tab. 13.3 Náklady na potřebné díly, konstrukční materiál a asistenční prvky na malosériovou výrobu CNC laserového stroje.

Typ nákladů\Varianta	Hliníkový rám [Kč]	Ocelový rám [Kč]
<b>Náklady na potřebné díly, konstrukční materiál a asistenční prvky na výrobu prototypu.</b>	85 172	72 044
<b>Náklady na konstruktéra.</b>	33 450	33 450
<b>Celkem</b>	<b>118 622</b>	<b>105 494</b>

## 14 SROVNÁNÍ PARAMETRŮ A EKONOMIKY

Nelze relevantně srovnávat cenu za pořízení hotového zařízení a cenu tohoto prototypu, nebo se jedná o vývojové zařízení, se kterým se zpravidla vážou i násobné náklady. Proto i při malosériové výrobě by bylo možné tyto náklady redukovat a náklady související s vývojem rozmělnit do vyráběné série. Tím by došlo ke snížení ceny jednoho kusu zařízení v případě prodeje celého stroje. Proto byla do srovnání ceny s konkurenčními stroji uvažovány náklady na malosériovou výrobu CO<sub>2</sub> laserem se svařením rámem.

Pro srovnání navrženého stroje a konkurenčních strojů byly zvoleny základní parametry stroje a prodejní cena. Pro porovnání byly zvoleny tyto parametry: maximální výkon, rozměry pracovní plochy, posuv stolu v ose Z, hmotnost, chlazení, ovládací software, možnost zapojení rotační osy, typ pracovního stolu, typ chlazení a prodejní cena. Porovnání parametrů CO<sub>2</sub> laserových strojů je vyjádřeno v tabulce (14.1).

Tab. 14.1 Porovnání parametrů CO<sub>2</sub> laserových strojů

Parametr	Vyroběný stroj	HL-80W	BRM Budget 6090
<b>Maximální výkon [W]</b>	80	80	80
<b>Pracovní plocha [mm]</b>	900 × 600	900 × 600	900 × 600
<b>Posuv v ose Z [mm]</b>	350	250	300
<b>Hmotnost [kg]</b>	210	250	280
<b>Ovládací software</b>	Rdcam	Rdcam	Rdcam
<b>Možnost zapojení rotační osy</b>	ANO	ANO	ANO
<b>Typ pracovního stolu</b>	Honeycomb	Honeycomb	Honeycomb
<b>Typ chlazení</b>	Prototypový s čerpadlem používaný v CW 5200	CW3000	CW3000
<b>Prodejní cena [Kč]</b>	<b>225 000</b>	<b>65 560</b>	<b>201 500</b>

Dle parametrů znázorněných v tabulce (14.1) můžeme usuzovat, že tyto tři porovnávané stroje si jsou dost podobné. Rozdíly jsou pouze v hmotnosti stroje, a to je způsobeno různými typy konstrukce. Další rozdíl je v typu chlazení laseru, které je dodávané s laserovým strojem. Nejvýkonnější chlazení obsahuje vyrobený laser. Rozdíl se objevil také v prodejní ceně. Nejlevnějším strojem je HL-80W čínské produkce. Cena je nízká, protože byly použity nekvalitní hardwarové prvky, jako jsou například drivery krokových motorů, elektrické zdroje a další méně výkonné asistenční prvky. Dále je tato cena nízká díky hromadné výrobě těchto strojů. Oproti tomu prodejní cena BRM Budget 6090 je vyšší než u HL-80W, což je s největší pravděpodobností podmíněno kvalitou zpracování, možností zajištění seřizování a servisu v ceně stroje podobu 2 let od koupě přímo od firmy Eurazio. Realizovaný stroj má nejvyšší prodejní cenu a to je způsobeno zvolením kvalitnějších prvků s vyšší životností a lepšími dosaženými parametry. Hlavní výhodou je dostupnost české zákaznické podpory.

## DISKUSE

Při realizaci a testování CNC CO<sub>2</sub> laserového stroje byly nalezeny konstrukční chyby, které by bylo nutné řešit jiným způsobem. Prvním nalezeným konstrukčním nedostatkem byl způsob uchycení skleněné laserové trubice. Jelikož je držák pevně přichycen ke konstrukci, je velice obtížné polohovat trubici na správnou pozici. Změna polohy je umožněna pouze pomocí korekce rámu. Tento konstrukční problém by byl neřešitelný při sériové výrobě, pokud by byl použit jako rám svařenec z ocelových profilů. Pro tuto skutečnost je nutné navrhnout plně polohovatelný držák laserové trubice, aby byla usnadněna kalibrace a seřízení laserové optické cesty.

Dalším konstrukčním nedostatkem je řešení vedení v ose Y. V návrhu byly pro posuv v ose Y zvoleny pojezdové vozíky, které jsou určeny pro pohyb ve V drážce hliníkových profilů. Tento typ řešení nebyl vhodný z důvodů vzniklé vůle mezi pojezdovými kolečkami a hliníkovým profilem. To mělo za následek vznik rozměrových nepřesností při řezání a gravírování. Zároveň se ukázalo, že toto vedení není uzpůsobeno pro větší posuvy než  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při sériové výrobě by vedení v ose Y bylo změněno na lineární kolejnicové vedení, tedy stejné jako je použito v ose X.

Pro zvýšení bezpečnosti by bylo nutné odstranit z vnitřního prostoru řídicí skříň. Ta by musela být přesunuta do speciálně navrženého boxu mimo stroj. Tím by se předešlo nebezpečí, kterým je vniknutí chladicího média do řídicí elektroniky. Takové řešení by znamenalo nutnost zavedení externího vzduchového chlazení elektroniky uvnitř boxu. To by udržovalo elektronické prvky při optimální teplotě a zamezilo by vniku nečistot do navržené řídicí skříně. Dalším důležitým bezpečnostním prvkem, který by bylo nutné nainstalovat do stroje je bezpečnostní zámek poklopu, který by sloužil jako pojistka před zraněním obsluhy. Spínač by nedovolil spustit laser, když by byl otevřený poklop.

Před samotnou sériovou produkcí stroje by bylo nutné provést rozsáhlejší testování funkčnosti a nastavení samotného laseru. Především by bylo nutné otestovat závislost rezné rychlosti na výkonu laseru při řezání více typů materiálů o různých tloušťkách. Dalším nutným testem, který by bylo vhodné provést, je gravírování 3D obrazů.

## ZÁVĚR

Konstrukce stroje je navržena s ohledem na definované parametry, které se týkají zejména pracovního prostoru, výkonu a využitelnosti stroje. Limitním rozměrem v návrhu konstrukce byla šířka celého stroje, která byla částečně podřízena požadované velikosti pracovního prostoru a také rozměru použité laserové trubici o výkonu 80 W a k tomu adekvátním systémům. Ve vnitřní části byly prvky uspořádány tak, aby bylo možné využít, co největší část stroje jako pracovní prostor a díky tomu moci řezat a gravírovat rozměrné díly. Pro zvýšení bezpečnosti stroje byly elektronické systémy a elektroinstalace separovány do samostatné sekce, aby nedošlo k jejich poškození, případně k úrazu obsluhy stroje.

Navržený stroj byl realizován a otestován. Na základě výsledků realizovaných testů související se seřízením a odladěním stroje lze konstatovat, že stroj vykazuje minimálně srovnatelné výsledky s konkurenčními produkty v dané výkonové kategorii. Z hlediska rozměrové přesnosti a stability řezu, navržený CO<sub>2</sub> laser dosahuje lepších výsledků. Hodnocení bylo prozatím hodnoceno pouze vizuálně, jsou však již naplánované experimenty, které by měli toto tvrzení doložit skutečnými měřeními a výsledky.

Pro návratnost prvotní investice byly uvažovány dvě cesty. První uvažovanou cestou pro návratnost investice je, že CNC řezací stroj bude schopný generovat zisky pomocí zakázkové a kusové výroby. Uvažujeme návratnost do dvou let. Při uvažované marži 30 % by pak pro uvažovanou návratnost investice bylo třeba generovat v pracovní dny tržby ve výši 1525,8 Kč. Druhá uvažovaná cesta návratnosti investice je, že navržený CNC laserový stroj bude prodáván jako produkt. Pro návratnost počáteční investice by bylo nutné vyrobit a prodat 2 stroje. Výroba těchto laserových strojů bude trvat 300 pracovních hodin, což odpovídá 1 měsíci a 18 pracovním dnům.

Při uvažování kusové nebo malosériové výroby stroje byla uvažována změna rámu za svařenec, což by umožnilo snížit náklady na samotný rám o 11,1 % oproti rámu hliníkovému. Hliníkový rám se prokázal jako výhodný pro vývojovou fázi celého stroje s ohledem na možnost rychlých změn.

Celková částka investice pro realizaci stroje činí 176 730 Kč s DPH. V částce jsou uvažovány náklady na pořízení komponent, obrábění, kooperaci a osobní náklady. Do ceny nejsou zahrnuty režijní náklady. Při sériové výrobě lze snížit náklady na výrobu o 40,1 % na hodnotu 105 494 Kč, protože do kalkulace již nevstupují náklady na stroje, nástroje a měřidla a zároveň byly sníženy náklady na konstrukční materiál díky změně rámu na svařenec. Předpokládaná tržní cena stroje při sériové výrobě činí 225 000 Kč a je tak vyšší než u zvolých konkurenčních strojů. Oproti těmto zařízením však tento návrh využívá kvalitnějších komponent v konstrukci stroje a lze tedy předpokládat delší životnost stroje, nižší opotřebení komponent a v důsledku také kvalitnějších výsledků při řezání a gravírování. Hlavní výhodou je dostupnost české zákaznické podpory.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [2] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [3] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [4] LASER. ZKRATKY.CZ [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.zkratky.cz/LASER/5904>
- [5] TOOSSI, A, M DANESHMAND a D SAMEOTO. A low-cost rapid prototyping method for metal electrode fabrication using a CO<sub>2</sub> laser cutter. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2013, **23**(4), 047001 [cit. 2021-02-28]. ISSN 0960-1317. Dostupné z: doi:10.1088/0960-1317/23/4/047001
- [6] Laser. *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [7] LASEROVÉ ŘEZÁNÍ. *Lasery a optika* [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [8] BILICAN, Ismail a Mustafa TAHSIN GULER. Assessment of PMMA and polystyrene based microfluidic chips fabricated using CO<sub>2</sub> laser machining. *Applied surface science* [online]. Elsevier B.V, 2020, **534** [cit. 2021-02-28]. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2020.147642
- [9] Technologické lasery. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
- [10] SLOW AXIAL-FLOW LASER. *American Welding Society* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://awo.aws.org/glossary/slow-axial-flow-laser/>
- [11] FAST AXIAL-FLOW LASERS. *American Welding Society* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://awo.aws.org/glossary/fast-axial-flow-lasers/>
- [12] TRANSVERSE AXIAL-FLOW LASERS. *American Welding Society* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://awo.aws.org/glossary/transverse-axial-flow-lasers/>
- [13] INDUSTRIAL CO<sub>2</sub> LASERS - Slab carbon dioxide lasers pack on power. *Laser Focus World* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16548345/industrial-co2-lasers-slab-carbon-dioxide-lasers-pack-on-power>
- [14] Princip CO<sub>2</sub> laseru. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
- [15] Elektromagnetické spektrum. *WikiSkripta* [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Elektromagnetick%C3%A9\\_spektrum](https://www.wikiskripta.eu/w/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum)
- [16] *Lasers in Dentistry—Current Concepts*. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-51943-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-51944-9
- [17] Zelené a UV lasery. *MegaBlog* [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>

- [18] PAŘÍZEK, Vladimír. Principy činnosti a aplikace polovodičových laserů. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. 1992, **37**(4), 205-222. ISSN 0032-2423.
- [19] Základní princip laseru. *Lasery a Optika* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [20] Quick guide on laser beam divergence measurement. *Gentec-EO* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.gentec-eo.com/blog/laser-beam-divergence-measurement>
- [21] Transverse Mode. *Networkx security* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.networkxsecurity.de/glossary-d1/t-d1/transverse-mode/>
- [22] Laser Safety Knowledge. *LaserTo* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <http://www.laserto.com/laser-safety-knowledge/>
- [23] Technical features in plain terms. *Trotec* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.troteclaser.com/en/knowledge/tips-for-laser-users/selection-of-the-right-lens/>
- [24] Focusing Lenses. *Mks Ophir* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.ophiropt.com/co2-lasers-optics/focusing-lens/knowledge-center/tutorial/focusing-lenses>
- [25] HOW TO CHOOSE THE CORRECT CO2 FOCUSING LENS FOR MY APPLICATION?. *BESCUTTER Powered by Laser* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://bescutter.com/pages/how-to-choose-the-correct-co2-focusing-lens-for-my-application>
- [26] Průmyslové lasery (5) - Laserové řezání. *MMspektrum* [online]. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: [https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani?fbclid=IwAR2powRm8H15hCLfGy6Dv\\_J0LPHhVExnVv7IJw7WnoPst2oW910SxCT5u6E](https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani?fbclid=IwAR2powRm8H15hCLfGy6Dv_J0LPHhVExnVv7IJw7WnoPst2oW910SxCT5u6E)
- [27] Řezání CO2 laserem – Optický systém Bifocal. *Konstrukce - odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: [http://old.konstrukce.cz/clanek/rezani-co2-laserem-opticky-system-bifocal/?fbclid=IwAR2VIKwDdnSphJJHgq3CxCq2\\_jkWegTLDqope0B5AIXbdaGEUM2bfFkcD\\_U](http://old.konstrukce.cz/clanek/rezani-co2-laserem-opticky-system-bifocal/?fbclid=IwAR2VIKwDdnSphJJHgq3CxCq2_jkWegTLDqope0B5AIXbdaGEUM2bfFkcD_U)
- [28] RADOVANOVIĆ, M., M. MADIĆ a B. NEDIĆ. Correlation between Surface Roughness Characteristics in CO2 Laser Cutting of Mild Steel. *Tribology in industry* [online]. University of Kragujevac, 2012, **34**(4), 232-238 [cit. 2021-04-04]. ISSN 0354-8996. Dostupné z: <https://doaj.org/article/56091639df5d47c5ac9b1de6cfdd9933>
- [29] CO2 Lens Failure Causes Part 2: Machine Power and Cooling System Problems. *Mate Precision Technologies* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.mate.com/co2-lens-failure-causes-part-2-machine-power-and-cooling-system-problems/>
- [30] Využití laseru při dělení a značení materiálů. *MMspektrum* [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyuziti-laseru-pri-deleni-a-znaceni-materialu.html>
- [31] Glass vs. Metal CO2 Laser Tubes. *EpilogLaser* [online]. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.epiloglaser.com/blog/glass-vs-metal-laser-tubes/>



- [32] Jaký je rozdíl mezi lasery DC (skleněné trubice) a RF (kovové kazety)? *Universal Laser System* [online]. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.profishignplus.cz/upload/files/uls-rozdily-laseru-dc-rf.pdf>
- [33] CloudRay Laser: Reci tube W1. *Cloudray laser solution* [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.cloudraylaser.com/products/reci-co2-laser-tube-w75w-180w-t-75w-100w-series-co2-laser-tube?variant=45425123016>
- [34] Choosing the right power supply for optimum laser performance. *Laser Focus World* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16549243/choosing-the-right-power-supply-for-optimum-laser-performance>
- [35] Napájecí zdroj CO2 laserových trubic. *FIT Eurazio* [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://cnc.inshop.cz/napajeci-zdroje/napajeci-zdroj-co2-laserovych-trubic-80-100-w>
- [36] Power supply T 100. *Cloudray laser solution* [online]. [cit. 2021-03-22].
- [37] Focusing on the Facts. *Shop floor lasers* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://shopfloorlasers.com/optics/249-focusing-on-the-facts>
- [38] OPTIKA DO CO2 LASERŮ. *EU technologies* [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://eu-technologies.cz/spravka/1-nky/optika-do-co2-laseru>
- [39] Jak pečovat o chlazení CO2 gravírovacích strojů. *ReklamniTechnologie.cz* [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.reklamnitechnologie.cz/clanek/10-chlazení-co2-gravírovacích-stroju>
- [40] Vodní chlazení CO2 laserů. *Megaflex* [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.megaflex.cz/lasery/prislusenstvi/vodni-chlazení-co2-laseru/>
- [41] Chladicí systém CW-3000. *EurazioCenter* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.eurazio.eu/cs/prislusenstvi/cw-3000>
- [42] N30-Zamia 30W RF CO2 Laser Tube. *SPT LASER TECHNOLOGY CO., LTD* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: [http://www.laserwd.com/product\\_n30-zamia-30w-rf-co2-laser-tube\\_33081.html](http://www.laserwd.com/product_n30-zamia-30w-rf-co2-laser-tube_33081.html)
- [43] Plyny – neviditelné tajemství zpracování materiálu laserem. *Technickyportal.cz* [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/plyny-neviditelne-tajemstvi-zpracovani-materialu-laserem\\_18781.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/plyny-neviditelne-tajemstvi-zpracovani-materialu-laserem_18781.html)
- [44] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. ISBN isbn80-7099-430-4.
- [45] CO2 laser HL-80W. *Aliexpress* [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/4001057041425.html?spm=2114.12010612.8148356.5.2ede1107uV2hbf>
- [46] BRM Budget 6090. *FIT Eurazio* [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://cnc.inshop.cz/co2-lasery-pro-rezani-a-gravírovani/ekonomicky-co2-laser-60-x-90cm-80w>
- [47] Značka výstrahy - Pozor laserové pracoviště. *REO AMOS* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.reoamos.cz/znacka-vystrahy-pozor-laserove-pracoviste/d-10696/>

- [48] Průměrná mzda - vývoj průměrné mzdy, 2021. *Kurzycz* [online]. [cit. 2021-04-20].  
Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/makroekonomika/mzdy/>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
<b>3D</b>	Trojrozměrný
<b>2D</b>	Dvourozměrný
<b>AWJ</b>	Obrábění hydroabrazivním paprskem
<b>CAD</b>	Počítačem podporované projektování
<b>CAM</b>	Počítačem podporované obrábění
<b>CM</b>	Chemické obrábění
<b>CNC stroj</b>	Počítačem řízený obráběcí stroj
<b>DC</b>	Stejnoseměrný
<b>DMLS</b>	Direct Metal Laser Sintering
<b>EBM</b>	Obrábění paprskem elektronů
<b>ECM</b>	Elektrochemické obrábění
<b>EDM</b>	Elektroerozivní obrábění
<b>EPDM</b>	Typ kaučuku
<b>FDM</b>	Fused Deposition Modeiling
<b>LAN</b>	Lokální síť
<b>Laser</b>	Light amplification by stimulated emission of radiation
<b>LBM</b>	Obráběním paprskem laseru
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>MDF</b>	Dřevovláknitá deska
<b>NC program</b>	Číslicově řízení program
<b>NMO</b>	Nekonveční technologie obrábění
<b>PBM</b>	Obráběním paprskem plazmy
<b>PETG</b>	Polyethylentereftalát
<b>RF</b>	Radiofrekvenční energie
<b>SLS</b>	Selective Laser Sintering
<b>TEM</b>	Transverse Electromagnetic Model
<b>USM</b>	Ultrazvukové obrábění
<b>WJM</b>	Obrábění paprskem vody
<b>*.ai</b>	Výkres vytvořený v programu Adobe Illustrator
<b>*.bmp</b>	Grafický soubor ve formátu Windows Bitmap

<b>*.dr</b>	Vygenerovaný formát programu RDworksV8
<b>*.dsb</b>	Datový grafický formát
<b>*.dxf</b>	Drawing Exchange format
<b>*.etc</b>	Grafický formát
<b>*.gcode</b>	Vygenerovaný formát pro řízení 3D tiskárny
<b>*.gif</b>	Grafický formát
<b>*.jpg</b>	Rastrový obrazový formát
<b>*.mng</b>	Multiple-image Network Graphics
<b>*.plt</b>	Vektorový soubor plotru vytvořený softwarem AutoCad
<b>*.png</b>	Přenosová síťová grafika
<b>*.stl</b>	Souborový formát pro ukládání prostorových těles

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<b>R<sub>a</sub></b>	[ $\mu\text{m}$ ]	Střední aritmetická hodnota drsnosti
<b>R<sub>z</sub></b>	[ $\mu\text{m}$ ]	Maximální výška profilu
<b><math>\Theta</math></b>	[-]	Divergence

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1      Propagační leták vyrobeného stroje

**CO<sub>2</sub> LASER 80 W - GOLIÁŠ  
OBCHODNÍ NABÍDKA**



**PŘÍLOHA 1**

## CO<sub>2</sub> LASER 80 W – GOLIÁŠ

Řada laserů Goliáš je určena zákazníkům, které lasery používají především pro své koničky a občasné použití.

Součástí dodávky je stroj včetně veškerého příslušenství nezbytného pro provoz, tedy kromě samotného stroje také vodní chlazení, kompresor pro ofuk materiálu a vдуchotechnika pro odtah zplodin.

Záruka na kompletní stroj včetně laserové trubice je 24 měsíců od data zakoupení.

**V ceně tohoto CO<sub>2</sub> laseru je již zahrnuto**

- kompletní CNC stroj
- zařízení pro ofuk materiálu
- zařízení pro odtah zplodin
- vodní chlazení
- software na obsluhu a řízení CNC stroje
- manuál k obsluze
- servisní služba na 2 roky

**PRODEJNÍ CENA STROJE**

# 225 000 Kč s DPH

## PARAMETRY STROJE

Zpracovatelné materiály	Řezání	Gravírování
Kovový materiál	NE	NE
Kovový materiál s vrchovou úpravou	NE	ANO
Plstř a filc	ANO	ANO
Sklo	NE	ANO
Dřevo, dýha, překližka	ANO	ANO
Lepenka dřevovláknité desky	ANO	ANO
Keramika, porcelán	NE	ANO
Korek	ANO	ANO
Kůže	ANO	ANO
MDF	ANO	ANO
Přirodní kámen, žula, mramor	NE	ANO
Guma, pryž	ANO	ANO
Papír	ANO	ANO
Textil (přirodní i umělé)	ANO	ANO
Akrylátová pryskyřice, PMMA	ANO	ANO
Polyester	ANO	ANO

Parametr	Hodnota
Hmotnost	210 kg
Vlnová délka	10,6 μm
Laserový zdroj / trubice	skleněná laserová trubice 80 W
Zdvíhací pracovního stolu	0 – 350 mm
Ohnisková vzdálenost	53,8 mm
Pracovní plocha	900 x 600 mm
Typ pracovního stolu	deska s otvory ve tvaru pláště
Rotacíí osa	volitelně
Přúchozí stroj	ne
Autofocus	ne
Rychlost řezného posuvu	0 - 300 mm·s <sup>-1</sup>
Přesnost v rovině XY	0,05 mm
Chlazení	vodní
Vnější rozměr	1400 x 895 x 710 mm
Ovládací software	LaserWork
Výkon	80 W