



# 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 ZHOTOVENÍ GRAVÍROVACÍHO LED LASERU

DESIGN AND MANUFACTURING OF AN ENGRAVING LED LASER

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Petr Hlaváček**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.**

**BRNO 2023**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Petr Hlaváček**  
Studijní program: Základy strojírenského inženýrství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2022/23

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

## Návrh a zhotovení gravírovacího LED laseru

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a zhotovení prototypu gravírovacího LED laseru. Návrh konstrukce LED laseru umožní jeho další využití pro jednoduché aplikace, mezi které patří např. tvarové řezání a gravírování organických materiálů.

### Cíle bakalářské práce:

Zhodnotit současný stav nekonvenčních technologií obrábění.  
Porovnat vlastnosti paprskových nekonvenčních technologií.  
Navrhnout konstrukci gravírovacího LED laseru.  
Porovnat výkonnost a přesnost navržené konstrukce oproti komerčním laserům.  
Spočítat náklady na stavbu gravírovacího LED laseru.

### Seznam doporučené literatury:

BENKO, B. a kol. Laserové technologie. Technická universita, Bratislava, 2000. ISBN 80-227-1425-9.

DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II. 2. vyd. CERM Brno, 7/2004. 237 s. ISBN 80-214-2683-7.

MOCEK, T. Laser: Super nástroj člověka 21. století. Praha: Academia, 2017. 47 s. ISBN 978-80-200-2691-0.

SADÍLEK, M. Nekonvenční metody obrábění I. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2009. 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.

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

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se věnuje dvěma hlavními tématům. Nejprve charakterizuje nekonvenční metody obrábění a rozděluje je do skupin podle účinku úběru materiálu. Každá metoda je vždy jednoduše a krátce vysvětlena. Smyslem této části je seznámit čtenáře s nekonvenčními technologiemi a jejich využitím ve strojírenské praxi. Následuje vzájemné porovnání paprskových metod, na které navazuje druhé velké téma zabývající se návrhem a konstrukcí plotru nesoucího LED laser. Cílem je sestrojít prototyp umožňující mimo gravírování i řezání do materiálů jako je lepenka. Primárním účelem tohoto stroje je výroba stavebnic pro modelovou železnici. Poslední kapitoly jsou věnovány ekonomickému zhodnocení a porovnání vyrobeného prototypu s komerčně prodávaným gravírovacím stojem.

### **Klíčová slova**

nekonvenční metody obrábění, gravírovací laser, LED laser, CNC řízení

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis is divided in two main topics. In first one it characterizes what unconventional machining methods are and divides them into groups according to the material removal effect. Each method is always simply and briefly explained. The purpose of this part is to introduce the unconventional technologies and their use in mechanical engineering. Second major topic follows comparison between beam methods and is dealing with the design and construction of a laser engraver. The goal is to build a prototype that allows not only engraving but also cutting into materials such as cardboard. The primary purpose of this machine is the production of kits for model railroad. The last chapters are about economic evaluation and comparison between made prototype and commercially sold engraver.

### **Keywords**

unconventional methods of machining, laser engraver, LED laser, CNC control

---

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HLAVÁČEK, Petr. *Návrh a zhotovení gravírovacího LED laseru* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149724>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaromír Dvořák.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Návrh a zhotovení gravírovacího LED laseru vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně dne 25. května 2023

místo, datum

Petr Hlaváček

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu své práce, panu Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Také bych rád poděkoval Markovi Severovi, Milanu Chudobovi, Filipu Strnadovi a Oldřichu Mátlovi nejen za odborné rady, ale hlavně za umožnění přístupu do strojních a jiných dílen a za asistenci při práci na stojích. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za podporu během celého studia. Zvláště pak děkuji svému bratrovi, který mi byl vždy ochoten poradit a pomoci.

---

---

**OBSAH**

Úvod.....	9
1 Nekonvenční metody obrábění.....	10
1.1 Dělení materiálu mechanickým účinkem.....	11
1.1.1 Obrábění ultrazvukem (USM – Ultrasonic machining).....	11
1.1.2 Obrábění vodním paprskem.....	12
1.2 Dělení materiálu tepelným účinkem.....	13
1.2.1 Elektroerozivní obrábění (EDM – Electro discharge machining).....	13
1.2.2 Obrábění paprskem elektronů (EBM – Electron beam machining).....	15
1.2.3 Obrábění paprskem laseru (LBM – Laser beam machining).....	16
1.2.4 Obrábění paprskem plazmy.....	19
1.3 Dělení materiálu chemickým nebo elektrochemickým účinkem.....	20
1.3.1 Chemické obrábění (CM – Chemical machining).....	20
1.3.2 Elektrochemické obrábění (ECM – Electro chemical machining).....	21
2 Porovnání paprskových technologií.....	22
3 Konstrukce gravírovacího LED laseru.....	24
3.1 Parametry a požadavky.....	24
3.2 Koncepční řešení.....	25
3.2.1 Koncept 1.....	25
3.2.2 Koncept 2.....	26
3.2.3 Volba vhodného řešení.....	27
3.3 Konstrukční řešení.....	27
3.3.1 První iterace návrhu.....	27
3.3.2 Druhá iterace návrhu.....	28
3.3.3 Pohybové jednotky.....	28
3.3.4 Rám a vnější kryt zařízení.....	31
3.4 Řízení.....	32
3.5 Testování.....	33
4 Technicko – ekonomické zhodnocení.....	36
5 Porovnání s komerčním laserem.....	38
Závěr.....	39
Seznam použitých zdrojů.....	40

---

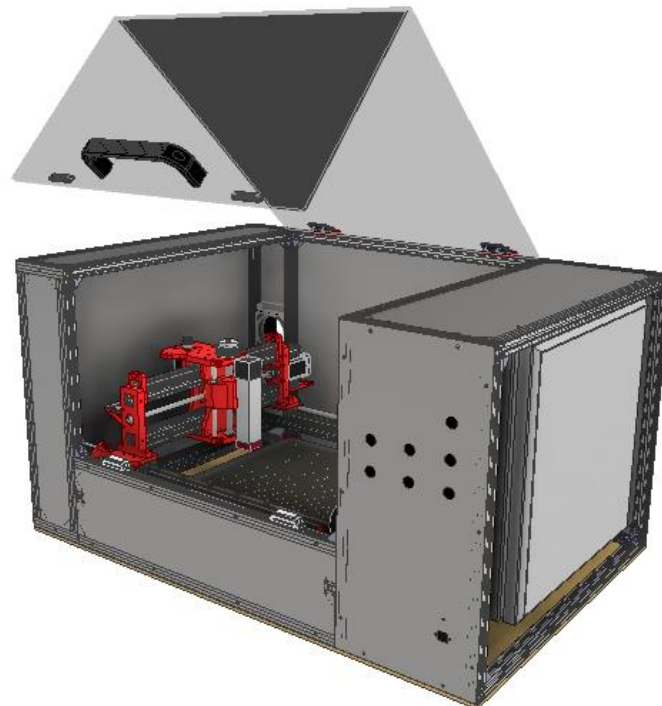


## ÚVOD

Počítačově číslicově řízené obráběcí stroje se staly běžnou součástí strojírenských podniků již dávno. Čím dál tím častěji se ale podobné stroje objevují i v domovech nadšenců. Příkladem tomu mohou být různé typy 3D tiskárny, hobby frézky nebo lasery. Nejvíce se uchytily bezesporu 3D tiskárny, které díky své cenové dostupnosti a jednoduchosti doslova zahltily trh. Méně časté frézky a lasery se objevují v provedení DIY (do it yourself; udělej si sám). Takto svépomocí postavené stroje je možné přizpůsobit požadavkům jednotlivce i za přiměřenou cenu.

Všechna zde již zmíněná zařízení fungují velice podobně a mají společné konstrukční prvky. Cílem této práce je návrh a konstrukce gravírovacího laseru. Avšak s myšlenkou možnosti pozdější úpravy na jiné podobné zařízení. Snaha je tedy o vytvoření stavebnicové konstrukce, kterou lze snadno modifikovat. Pro představu o finální podobě návrhu slouží obrázek 1.

Primární účel stroje je výroba stavebnic pro modelovou železnici. Z toho vyplývají nároky na parametry stroje, které budou popsány v samostatné kapitole, protože zásadním způsobem ovlivňují výsledný návrh.



Obrázek 1 Model zařízení

## 1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Pojem nekonvenční metody obrábění označuje technologie, které využívají pro odběr materiálu tepelných, elektrických, mechanických (abrazivních) nebo chemických principů, popřípadě jejich kombinaci. Nepoužívá se klasický řezný nástroj a při obrábění se netvoří tříska v pravém slova smyslu [1]. Používají se v případech, kdy je obráběný materiál konvenčními metodami jen těžko obrobitelný, nebo dokonce neobrobitelný. Také umožňují vyrábět tvarově velmi složité součásti u kterých by konvenční metody jako jsou frézování, soustružení, vrtání atd. narážely na své technologické limity. [2]

Nástroj nelze obecně pro všechny metody definovat pojmy jako jsou břit, čelo nebo hřbet. Také nemusí platit, že má větší tvrdost a pevnost než obráběný materiál. U nekonvenčních metod totiž rychlost a výkonnost obrábění nezáleží na mechanických vlastnostech polotovaru. Lze tak obrábět materiály s vysokou pevností, tvrdostí, houževnatostí a materiály odolné proti opotřebení. [1]

Podle principu oddělování materiálu lze nekonvenční metody rozdělit do tří skupin:

- a) Mechanickým účinkem
- b) Tepelným účinkem
- c) Chemickým nebo elektrochemickým účinkem

Do těchto skupin lze poté zařadit jednotlivé metody, jejichž vhodnost použití zobrazuje tabulka 1. Zkratky vycházejí z anglických slov a mají následující význam: USM – obrábění ultrazvukem, AWJM – obrábění paprskem vody s abrazivem, EDM – elektroerozivní obrábění, EBM – obrábění paprskem elektronů, LBM – obrábění paprskem laseru, PBM – obrábění paprskem plazmy, CM – chemické obrábění a ECM – elektrochemické obrábění.

Tabulka 1 Aplikační oblasti nekonvenčních metod obrábění [1]

Obráběný materiál	Nekonvenční metody obrábění								Konvenční obrábění	
	Mechan. Účin.		Tepelný účinek				Chemický účin.			
	USM	AWJM	EDM	EBM	LBM	PBM	CM	ECM	Fréz.	Soust.
Slitiny Al	C	C	B	B	B	A	A	B	A	A
Oceli	B	D	A	B	B		A	A	A	A
Superslit.	C	D	A	B	B		B	A	B	B
Keramika	A	D	D	A	A		C	D	D	C
Sklo	A	D	D	B	B		B	D	D	C
Křemík			D	B	B		B	D	D	B
Plasty	B	B	D	B	B		C	D	B	C
Lepenky	D	A	D				D	D	D	D
Textil	D	A	D				D	D	D	D

A – velmi vhodné, B – vhodné, C – obtížné, D – nelze aplikovat.

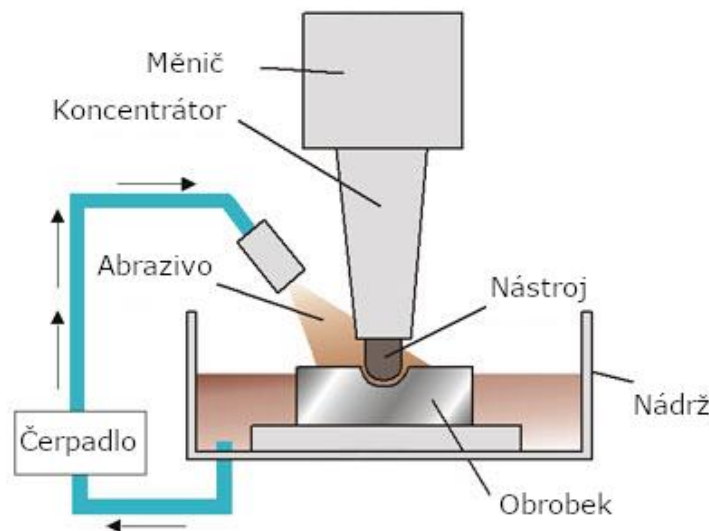
## 1.1 Dělení materiálu mechanickým účinkem

### 1.1.1 Obrábění ultrazvukem (USM – Ultrasonic machining)

Obrábění probíhá společným účinkem pohybu zrn abrazivního materiálu a kavitačním účinkem kapaliny [3]. Na obrázku 2 je zobrazeno jednoduché schéma zobrazující princip metody.

Generátor střídavých kmitů přemění střídavý elektrický proud o frekvenci sítě na proud o frekvenci 18–25 kHz. Následuje měnič, který na principu magnetostrikce<sup>1</sup> přemění elektromagnetické kmitů na mechanické. Amplituda těchto kmitů je dále zesílena pomocí koncentrátoru. Takto získané kmity se přenáší na nástroj, který kmitá kolmo k obráběnému povrchu. Mezi nástroj a obrobek je dodávána kapalina s obsahem abraziva (brusiva). Velká kinetická energie zrn abraziva způsobuje narušování celistvosti obráběného povrchu [4]. Intenzitu úběru materiálu ještě zvyšuje svým kavitačním účinkem kapalina [3]. Jejím primárním úkolem je však přívod nových zrn do pracovní mezery, a naopak odvod zrn opotřebovaných. Používá se voda, petrolej, líh nebo strojní olej. Koncentrace brusiva v kapalině závisí na tvrdosti obráběného materiálu, ale pohybuje se v rozsahu 30 až 40 hm.% [4]. Používají se brousící zrna z diamantu, kubického nitridu bóru (KNB), karbidu bóru ( $B_4C$ ), karbidu křemíku (SiC) nebo oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ) [3]. [5]

Ultrazvukové obrábění je určeno především pro obrábění tvrdých a křehkých materiálů. Lze jím obrábět elektricky vodivé i nevodivé materiály jako jsou slinuté karbidy, kalené oceli, kevlar, keramické materiály ale také sklo nebo polodrahokamy. Naopak plastické materiály jsou touto technologií neobrobitelné, protože odolávají abrazivnímu rozrušování a dochází u nich k nadměrnému opotřebování nástroje. Nástroje se vyrábějí z konstrukční oceli, korozivzdorné oceli, mědi nebo mosazi. [3]



Obrázek 2 Schéma obrábění ultrazvukem, upraveno dle [6]

<sup>1</sup> Magnetostrikce – vlastnost feromagnetických materiálů měnit své rozměry v magnetickém poli

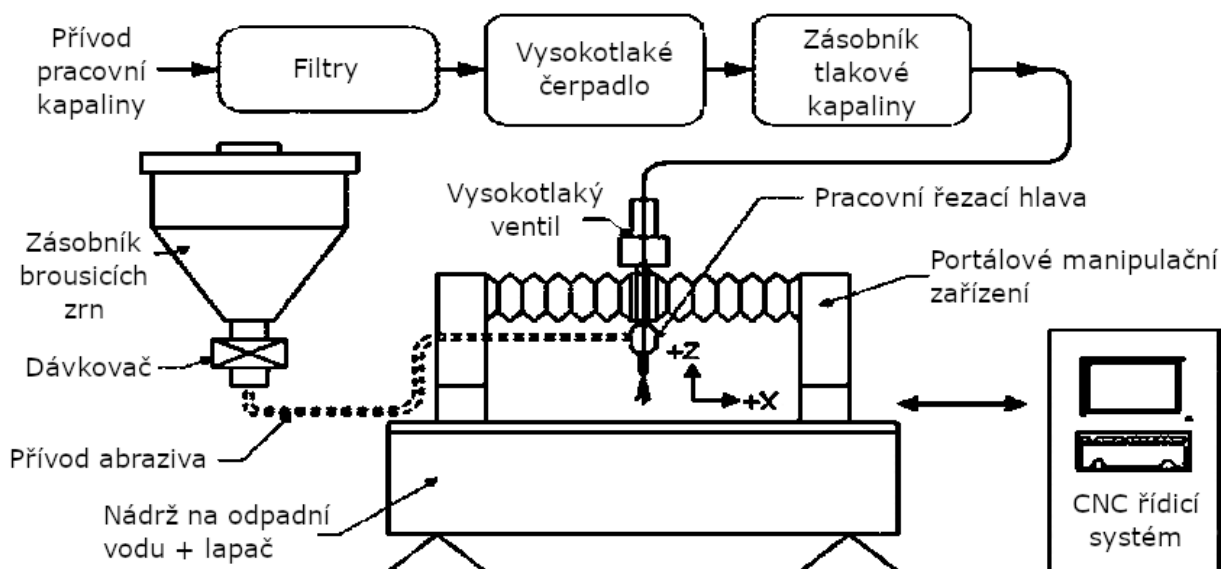
### 1.1.2 Obrábění vodním paprskem

Obrábění vodním paprskem, též označované jako hydrodynamické obrábění [7], je metoda založená na přeměně kinetické energie molekul vody na mechanickou práci, za současného působení kavitační koroze. Řezným nástrojem je vysokotlaký a vysokorychlostní vodní paprsek, který se vůči okolí chová jako pevné těleso. V kapalině se také za určitých podmínek tvoří bublinky syté páry. Při jejich zániku vznikají rázy, které vytrhávají částice materiálu z povrchu obrobku. Tento jev se označuje jako kavitační koroze. V praxi se nejčastěji používá řezání čistým vodním paprskem (WJM – Water jet machining) nebo řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí (AWJM – Abrasive water jet machining). U druhého zmíněného se navíc využívá účinku působení zrn brousícího materiálu. Kinetická energie zrn se při styku s materiálem obrobku přemění na mechanickou práci. [8]

Jako pracovní kapalina se nejčastěji používá voda, ale lze použít obecně jakoukoli kapalinu. Při řezání cukrářských výrobků například kakao. Jako brousící materiál se používají zrna křemičitého písku, olivínu, granátu nebo kubického nitridu boru. [8]

Hlavní části zařízení pro řezání vodním paprskem jsou schematicky znázorněny na obrázku 3. Z přiváděné kapaliny se nejprve odstraňují nečistoty pomocí čistících filtrů. Následně dochází ke zvýšení tlaku ve vysokotlakém čerpadle. Pro udržení konstantního tlaku slouží zásobník tlakové kapaliny. Následuje vysokotlaké potrubí, které přivádí pracovní kapalinu o tlaku 200 až 600 MPa k řezací hlavě. V případě čistého vodního paprsku je ve spodní části řezací hlavy safírová tryska o výstupním průměru 0,1 – 0,4 mm. Pro případ paprsku s abrazivní příměsí má safírová tryska výstupní průměr 0,25 mm a za ní ještě následuje směšovací komora, kde jsou na principu ejektoru nasávána brousící zrna. Množství abraziva lze regulovat pomocí dávkovače umístěného na zásobníku brousících zrn. Takto vyrobená směs opouští směšovací komoru skrz řezací trysku, která je vyrobená z karbidu wolframu nebo z keramiky a její výstupní průměr je 0,8 – 2 mm. [8]

Výhodou obrábění vodním paprskem je možnost vícesměrného řezání s nulovým poloměrem zaoblení. Před opracováním tvaru není třeba předvrtat díru a během řezání se netvoří prach. Lze obrábět všechny druhy kovových i nekovových materiálů včetně těch citlivých na teplo. Tato metoda lze také snadno automatizovat. [7]



Obrázek 3 Schéma obrábění vodním paprskem, upraveno dle [9]

## 1.2 Dělení materiálu tepelným účinkem

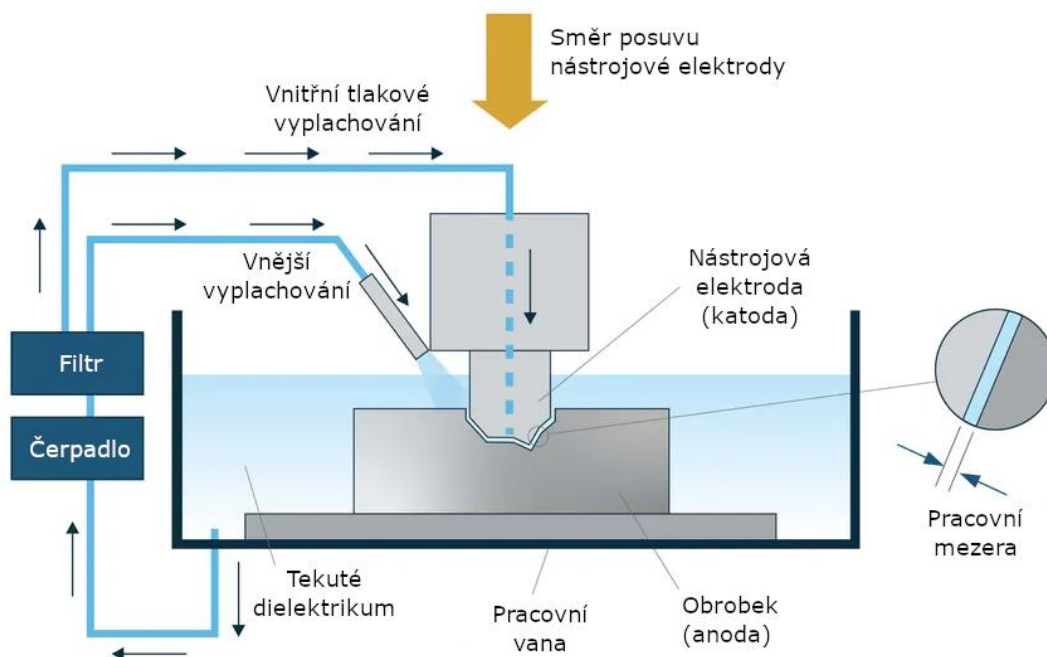
### 1.2.1 Elektroerozivní obrábění (EDM – Electro discharge machining)

K úběru materiálu dochází převážně v důsledku elektroeroze. Z toho vyplývá, že tímto způsobem lze obrábět pouze elektricky vodivé materiály. V mezeře mezi nástrojem a obrobkem dochází k periodicky se opakujícím výbojům a vlivem vysoké koncentrace energie materiál taje a odpařuje se. [8]

#### Hloubení dutin

Na obrázku 4 je schéma elektroerozivního stroje pro hloubení dutin zápustek a forem. Nástroj a obrobek jsou připojeny ke generátoru stejnosměrných pulzů. Nástrojová elektroda nejčastěji tvoří katodu a obrobek anodu. K výboji dochází v místě nejsilnějšího elektrického napětového pole. Každá jiskra produkuje dostatečné teplo k vytvoření mikroskopického kráteru. Teplota v místě výboje dosáhne 3 000 až 12 000 °C a dochází tak současně k vypařování tekutého dielektrika. Vznikají bubliny, které praskají a napomáhají tak úběru částic materiálu z obrobku. Dielektrikum zároveň působí jako izolátor mezi elektrodami a ohraničuje místo výboje (tzv. výbojový kanál). Také odvádí z pracovního prostředí vzniklé teplo a odebraný materiál. Jako dielektrikum se používá strojní olej, transformátorový olej, petrolej, destilovaná nebo deionizovaná voda a speciální dielektrika dodávaná výrobcem strojů. [8]

Dielektrikum se čistí ve filtru a znovu se přivádí do pracovní mezery. Podle způsobu přívodu se rozlišuje více druhů tzv. vyplachování. Nejčastěji se používá vnější vyplachování (obrázek 4). Při vnitřním tlakovém vyplachování je dielektrikum přiváděno otvorem v nástrojové elektrodě přímo do pracovního prostoru. Další způsob je pulzní vyplachování, které spočívá v krátkém přerušení procesu elektroeroze a současném oddálení nástroje od obrobku, čímž se zvětší pracovní mezera a dosáhne se dokonalého vypláchnutí. [8]



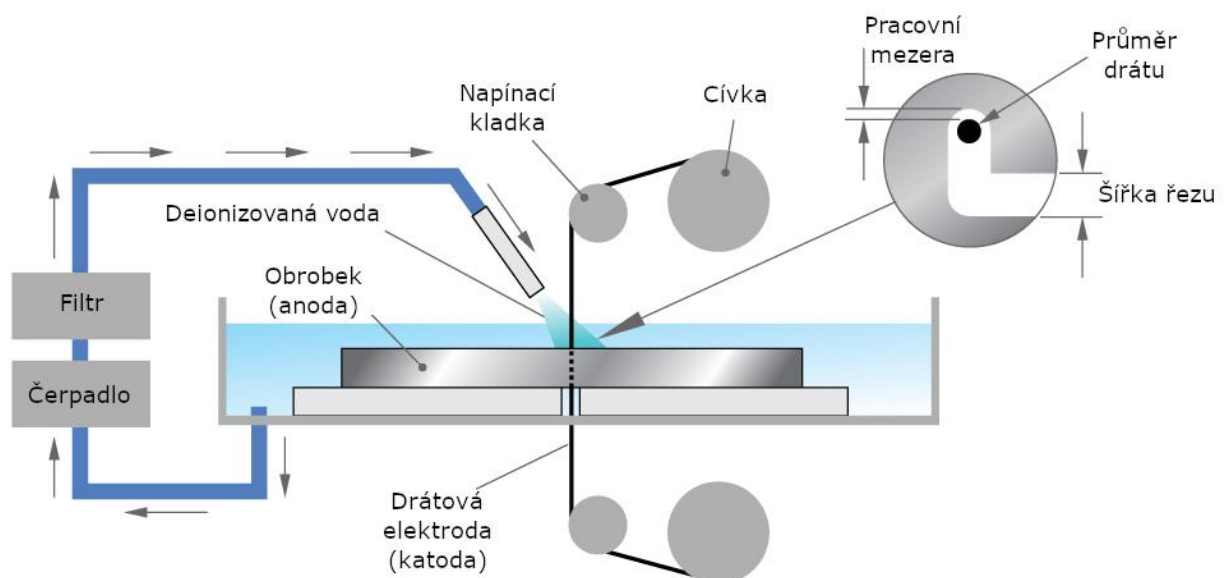
Obrázek 4 Schéma elektroerozivního hloubení dutin, upraveno dle [10]

Během procesu obrábění dochází k úběru materiálu nejen na obrobku ale i na nástrojové elektrodě. Proto se vyrábí z materiálů, které mají odolnost vůči elektrické erozi. Zároveň však musí mít dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, vysoký bod tání a bod varu, vyhovující mechanickou pevnost, stálost tvarů, malou tepelnou roztažnost a dobrou obrobitelnost. Z kovových materiálů těmto požadavkům vyhovuje např. elektrolytická měď, slitina wolframu a mědi, slitina wolframu a stříbra, slitina chromu a mědi nebo mosaz. [8]

Mimo výrobu zápusitek a forem se elektroerozivní obrábění používá také k výrobě tvarově složitých povrchů. Rozdíl je v provedení nástrojové elektrody a ve tvaru obráběného povrchu, který není tvořen uzavřenou dutinou, ale jedná se o vnější tvar, drážku nebo průchozí díru. K tomuto účelu se využívají stroje s CNC řídicím systémem s více řízenými pohybovými osami. [8]

### Drátové řezání

Další metodou elektroerozivního obrábění je řezání drátovou elektrodou (obrázek 5). Platí zde všechny zákonitosti elektrické eroze uvedené dříve. Liší se však nástrojovou elektrodou, kterou tvoří tenký drát. Požadavky na drátovou elektrodu jsou obdobné jako při hloubení dutin. Navíc však musí mít vysokou tvarovou přesnost (kruhovitost). Drát je většinou měděný, na větší průměry se používá mosazný a na velmi jemné řezy se používá molybdenový. Aby se předešlo jeho nadměrnému opotřebení, dochází v průběhu obrábění k odvíjení drátu pomocí speciálního zařízení. Stroje jsou opět vybaveny CNC řídicím systémem, který umožňuje i naklánění drátové elektrody v rozsahu  $0^\circ$  až  $30^\circ$ . Řezání drátovou elektrodou nachází uplatnění zejména při výrobě střížných a lisovacích nástrojů a při dělení ultratvrdých materiálů s minimální šířkou řezu. [7; 8]



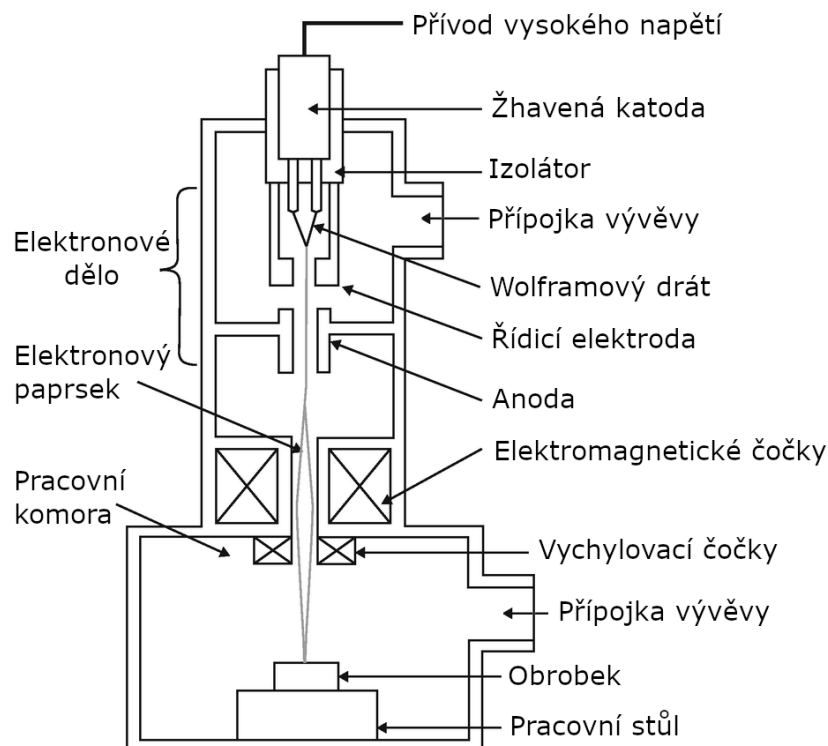
Obrázek 5 Schéma elektroerozivního řezání drátovou elektrodou, upraveno dle [11]

### 1.2.2 Obrábění paprskem elektronů (EBM – Electron beam machining)

K obrábění se využívá soustředěného svazku elektronů o vysoké rychlosti, který dopadá na obráběný materiál. Kinetická energie elektronů se mění na tepelnou energii, materiál obrobku taje a odpařuje se. [7]

Základem zařízení pro obrábění elektronovým paprskem (obrázek 6) je zdroj elektronů tzv. elektronové dělo. To se skládá ze žhavené wolframové katody a anody. Elektrony uvolněné z katody jsou pomocí vhodně řešené anody urychleny na rychlost rovnající se asi dvěma třetinám rychlosti světla. Paprsek se pak pomocí elektromagnetických čoček zaostří na velmi malou plochu. Vychylovací čočky zase umožňují paprsek vychylovat nebo rozdělovat do potřebných směrů [12]. Aby bylo dosaženo vysoké účinnosti (až 95 %), probíhá pracovní cyklus většinou ve vakuu. Ve vnitřním prostoru elektronového děla je vytvořeno vakuum vyšší než  $10^{-5}$  Pa [12]. Systémem vývěv se odčerpává také vzduch z pracovní komory, ve které je umístěn obrobek. Zde lze dosáhnout vakua až  $10^{-3}$  Pa [13]. [8]

Obrobitelnost materiálů touto metodou nezávisí na mechanických vlastnostech jako je tvrdost, houževnatost, elektrická vodivost a bod tavení, ale je dána jejich fyzikálními vlastnostmi. Elektronový paprsek lze použít především na těžkoobrobitelné materiály jako jsou žárupevné oceli, wolfram, titanové slitiny a speciální slitiny používané v letectví a kosmonautice. Ve strojírenské praxi se tato metoda nejčastěji používá pro svařování a vrtání dlouhých děr malých průměrů (od průměru 0,015 mm). Řezání a tepelné zpracování materiálu je nahrazováno laserem. [8]



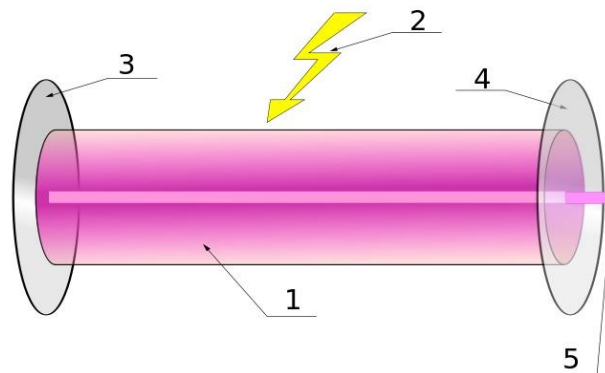
Obrázek 6 schéma obrábění paprskem elektronů, upraveno dle [14]

### 1.2.3 Obrábění paprskem laseru (LBM – Laser beam machining)

Princip metody je schovaný přímo v jejím názvu. Slovo LASER je totiž zkratka anglických slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesílení světla pomocí vybuzené emise záření [15].

Světlo obecně vzniká přechodem atomů z vyššího do nižšího energetického stavu. Fotony obyčejného světla toho nemají vzájemně moc společného. Šíří se všemi směry, mají různé vlnové délky atd. Naopak paprsek laseru je vysoce monochromatický<sup>2</sup> a prostorově i časově koherentní<sup>3</sup>. Toho se docílí stimulovanou emisí světla. Pomocí budícího záření dochází k přechodu elektronu atomu ze své stávající dráhy (E1) na dráhu s vyšší energetickou úrovní (E2). Takto vybuzený elektron prakticky okamžitě přechází na metastabilní hladinu (Em), která leží mezi E1 a E2. Další dopadající záření donutí přejít elektron zpět na svoji původní energetickou hladinu (E1). Přitom dojde k vyzáření dvounásobku energie ve formě fotonů a tím k zesílení světla. Látky, ve kterých k tomuto jevu může docházet se nazývají aktivní prostředí. [16]

Na obrázku 7 je zobrazeno schéma platné pro většinu druhů laserů. Fotony vzniklé stimulovanou emisí je třeba zformovat. K tomu slouží optický rezonátor, který je tvořen dvěma, nejčastěji sférickými zrcadly. Fotony se od zrcadel odrážejí sem a tam, a stimulují další vybuzené atomy. Intenzita světla postupně narůstá až překročí určitou mez a část světla projde polopropustným zrcadlem a vytvoří laserový paprsek. Poté dochází k dalšímu buzení elektronů a celý děj se opakuje. [8]



Obrázek 7 Princip laseru [17]

1 – Aktivní prostředí; 2 - Buzení; 3 – Nепropustné zrcadlo;  
4 – Polopropustné zrcadlo; 5 – Páprsek laseru

Podle druhu aktivního prostředí lze lasery rozdělit na:

- a) Pevnolátkové
- b) Plynové
- c) Kapalinové
- d) Polovodičové

<sup>2</sup> Monochromaticnost – záření má pouze jednu vlnovou délku

<sup>3</sup> Koherence – frekvence záření je stále stejná a rozdíl fází se nemění



### Pevnolátkové lasery

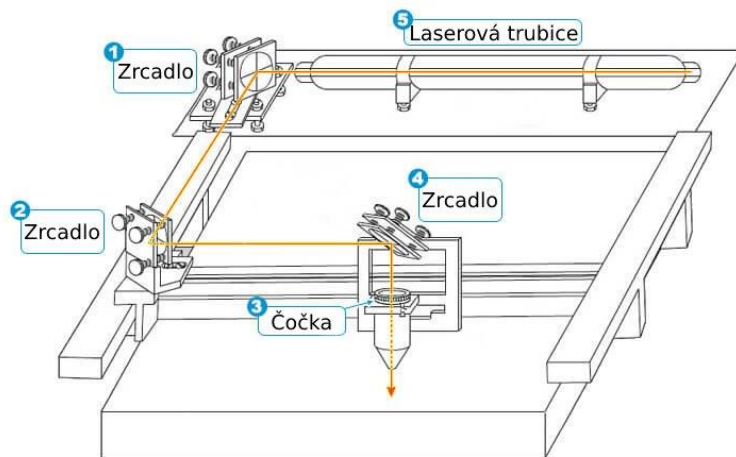
Aktivní prostředí tvoří pevné krystalické, popřípadě amorfní látky, dopované příměsí vhodných plynů. U klasického provedení je krystal vybroušen do tvaru válečku. Nejčastěji používaným typem je Nd:YAG, kde je yttrito-hlinitý granát (YAG) dopovaný neodymem (Nd). Vlnová délka tohoto typu laseru je  $1,06 \mu\text{m}$  a jeho výkon v kontinuálním provozu dosahuje podle [8] maximálně 4 kW, ale podle [18] dokonce 6 kW. V současné době stále probíhá jejich vývoj, a tak lze očekávat další navyšování výkonu. Největšími novinkami na trhu jsou pak tzv. innoslab lasery, kotoučové lasery a vláknové lasery. [18]

U pevnolátkových laserů dochází k přenosu paprsku od zdroje k místu použití pomocí optických vláken. Pro svoji flexibilitu jsou proto oblíbené ve spojení s roboty např. pro svařování karosérií v automobilovém průmyslu. [18]

### Plynové lasery

Patří mezi nejvýkonnější typy laserů vůbec. Aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů. V průmyslové praxi mají největší význam CO<sub>2</sub> lasery, jejichž aktivní prostředí je tvořeno směsí oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>), dusíku (N<sub>2</sub>) a hélia (He) [8]. Jejich paprsek má vlnovou délku  $10,6 \mu\text{m}$ . Nejnovějším typem je tzv. „slab“ CO<sub>2</sub> laser, který se díky deskovému tvaru elektrod lépe chladí a dosahuje vysoké kvality paprsku. [18]

Zásadní nevýhodou plynových laserů je nemožnost vedení paprsku optickým vláknem. Paprsek se přenáší soustavou zrcadel, což značně komplikuje konstrukci (obrázek 8). Tento nedostatek se začal primárně pociťovat u robotických pracovišť. Vývoj však umožňuje umisťovat lasery přímo na rameno robotu, a to hlavně díky snižování hmotnosti vlastních laserů a zvyšování nosnosti robotů. [18]



Obrázek 8 Konstrukce CO<sub>2</sub> laseru, soustava zrcadel [19]

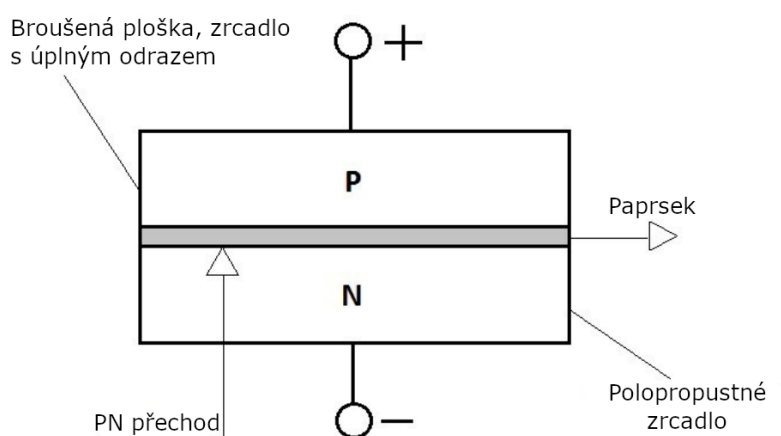
### Kapalinové lasery

Aktivním prostředím jsou v tomto případě roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných zemin. Kombinací vhodného barviva a zrcadla rezonátoru lze získat záření o vlnové délce od  $0,3$  do  $1,3 \mu\text{m}$ . Z toho důvodu se kapalinové lasery využívají především ve spektroskopii k bezkontaktní, nedestruktivní analýze látek. [8]

## Polovodičové lasery

Laserová dioda (obrázek 10) je v současné době nejúčinnějším zdrojem laserového záření s účinností až 50 %. Další její výhodou je nízká cena, která vedla k masovému rozšíření ve spotřební elektronice (např. čtečky kódů, CD a Blue-ray přehrávače, laserové tiskárny nebo ukazovátka). [15]

Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál a z něj vytvořený PN přechod (obrázek 9). Používá se galium arsenid (GaAs), kadmium sulfid (CdS) a kadmium selen (CdSe). Podle použitého polovodiče generují záření o různé vlnové délce v rozsahu 0,3 až 30  $\mu\text{m}$ . Buzení může být realizováno fotony, svazkem elektronů nebo elektrickým polem. [8] Největší nevýhodou je menší kvalita paprsku než u jiných typů laserů. Vystupující paprsek má tvar obdélníkové plochy, což není vhodné např. pro víceměrné řezání. Paprsek je pak ještě nutné dodatečně ostřit na čtvercový nebo kruhový tvar. [20]



Obrázek 9 Princip polovodičového laseru [15]



Obrázek 10 Laserová dioda [21]

Následující tabulka (tabulka 2) ukazuje srovnání vybraných parametrů CO<sub>2</sub>, Nd:YAG a výkonného polovodičového laseru.

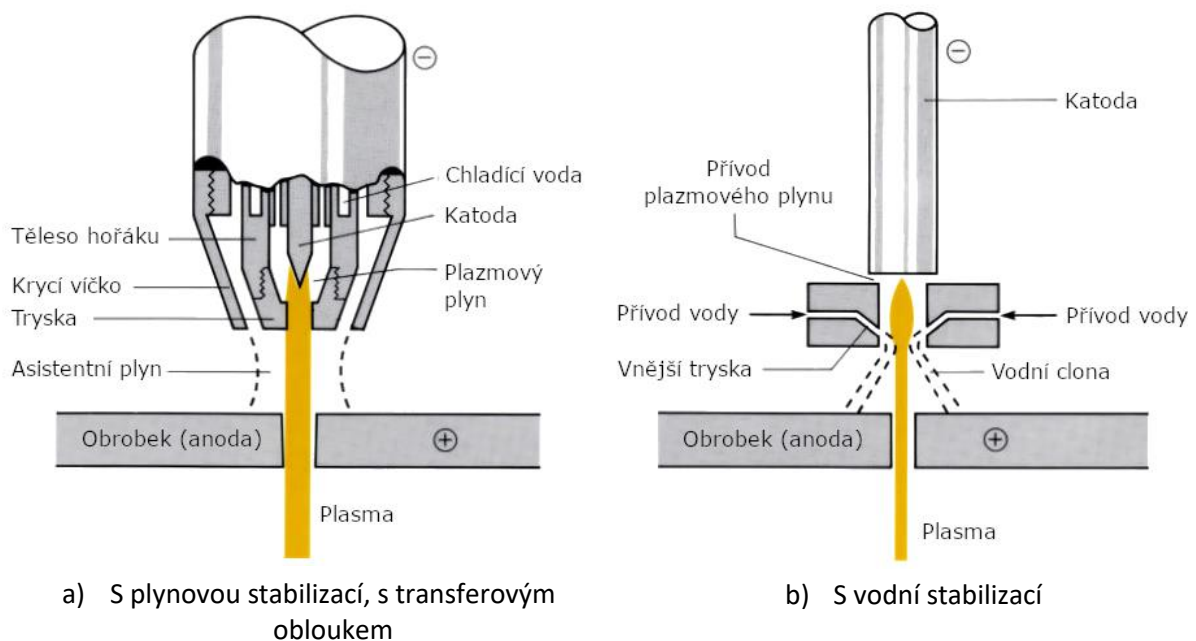
Tabulka 2 Srovnání parametrů laserů, upraveno dle [8]

Vlastnosti		CO <sub>2</sub> laser	Nd:YAG laser	Výkonný polovodičový laser
Délka vlny	( $\mu\text{m}$ )	10,6	1,06	0,3 až 30
Účinnost	(%)	10–15	3–8	30–50
Velikost pracovní hlavy laseru	(dm <sup>3</sup> )	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	1
Střední výstupní výkon	(kW)	do 30	do 4	do 2
Střední intenzita zaostřeného paprsku	(Wcm <sup>-2</sup> )	10 <sup>6...30</sup>	10 <sup>5...9</sup>	10 <sup>3...5</sup>
interval údržby	(h)	1000	500	2000 až 10000

### 1.2.4 Obrábění paprskem plazmy

Plazma vzniká ionizací plynu za extrémně vysokých teplot. Molekuly plynu se s rostoucí teplotou rozdělí na atomy a při dalším zvyšování teploty dojde k odtrhávání elektronů z elektronových obalů. Takto vzniklé volné náboje způsobí, že je plazma elektricky vodivá. [22]

Plyny, ze kterých se ionizací získává plazma, se nazývají plazmové plyny. K tomuto účelu se používá argon, helium, dusík nebo směs argonu s vodíkem. Fokusační plyny zase slouží k zaostření paprsku plazmatu po jeho výstupu z trysky. Používá se argon, dusík, směs argonu s vodíkem nebo s dusíkem. Poslední skupinou jsou asistentní nebo také ochranné plyny. Ty obklopují paprsek a pracovní místo a chrání je tak před účinkem atmosféry. Používá se argon nebo dusík. Podle stabilizace elektrického oblouku se plazmové hořáky dělí na hořáky s plynovou stabilizací a s vodní stabilizací (obrázek 11). [8]



Obrázek 11 Plazmové hořáky, upraveno dle [23]

Obrábění plazmou je založeno na ohřevu nebo tavení materiálu za teploty nad 10 000 °C. V praxi se takové teploty dosáhne pomocí elektrického oblouku, který hoří mezi dvěma elektrodami. Uvnitř hořáku je umístěná katoda vyrobená z wolframu. Anodu tvoří opracovávaný materiál nebo těleso hořáku. Plazmový hořák s plynovou stabilizací lze podle [8] rozdělit na systémy:

a) **S transferovým obloukem**

Elektrický oblouk hoří mezi katodou a obráběným materiálem (obrázek 11a).

Označuje se zkratkou PAM – Plasma arc machining.

Používá se pro vodivé materiály (řezání ocelí a neželezných kovů).

b) **S netransferovým obloukem**

Elektrický oblouk hoří mezi katodou a výstupní tryskou, která tvoří anodu.

Označuje se zkratkou PBM – Plasma beam machining.

Používá se pro obrábění nevodivých materiálů (např. keramiky), nebo k nanášení povlaků.

Výhodou plazmového hořáku s vodní stabilizací je možnost řezat i pod vodou. Sníží se tak hlučnost, prašnost a vliv UV záření na obsluhu. Plazmové hořáky lze obecně použít pro řezání, svařování, navařování, obrábění těžkoobrobitelných materiálů atd. [24]

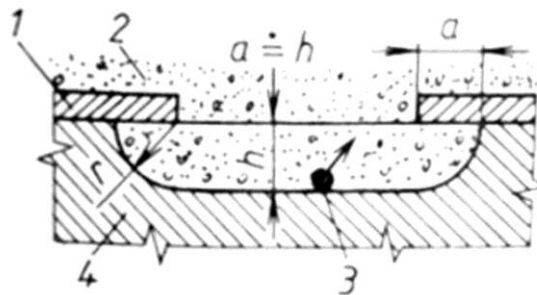
### 1.3 Dělení materiálu chemickým nebo elektrochemickým účinkem

#### 1.3.1 Chemické obrábění (CM – Chemical machining)

K úběru materiálu dochází chemickou reakcí mezi obrobkem a nástrojem, kterým je chemická látka. Do této technologie patří leptání a termické odstraňování otřepů. Pro elektroniku byly vyvinuty speciální metody pro leptání křemíku (anizotropické a selektivní leptání), které zde nebudou uvedeny. [8]

#### Leptání

Jedná se o řízené odleptávání vrstev materiálu z povrchu obrobku. Tato metoda je také někdy označována jako chemické frézování (obrázek 12). Obrobek se musí před vlastním leptáním očistit, odmastit a místa, která nemají být obrobena, se zakryjí ochrannou vrstvou. Na vytvoření tzv. masky se používají speciální laky, polyvinylové nebo polyamidové pryskyřice. Rychlost obrábění není závislá na velikosti obrobku, ale pouze na hloubce odebíraného materiálu, a pohybuje se v rozmezí  $0,01$  až  $0,4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Maximální hloubka odleptávané vrstvy také závisí na odolnosti masky proti chemickému narušení. Ochranné nátěry snesou zhruba 8 až 10 hodin leptání, z čehož plyne maximální hloubka okolo 10 mm. Tímto způsobem se nejlépe obrábějí slitiny hliníku, hořčíku, titanu, konstrukční uhlíkové oceli, korozivzdorné oceli, měď a mosaz. Obrábění je bezsilové a nedochází tak k deformaci obrobku. Používá se např. k výrobě nosníků leteckých konstrukcí. [7; 8]



Obrázek 12 Princip chemického obrábění [8]

1 – maska; 2 – nástroj (chemická leptací látka); 3 – odebrané (odleptané) částice materiálu;  
4 - obrobek

#### Termické odstraňování otřepů

Obrobek je umístěn do uzavřené pracovní komory, která je následně vyplněna směsí vodíku a kyslíku (obvykle v poměru 2:1). Elektrickou jiskrou dojde k zapálení směsi, čímž vzroste teplota v pracovní komoře až na  $3500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Z povrchu obrobku jsou tak odstraněny otřepy, které během velmi krátké doby shoří. Po odstranění otřepů je nutné součást vyprat v ultrazvukové pračce. [8]

### 1.3.2 Elektrochemické obrábění (ECM – Electro chemical machining)

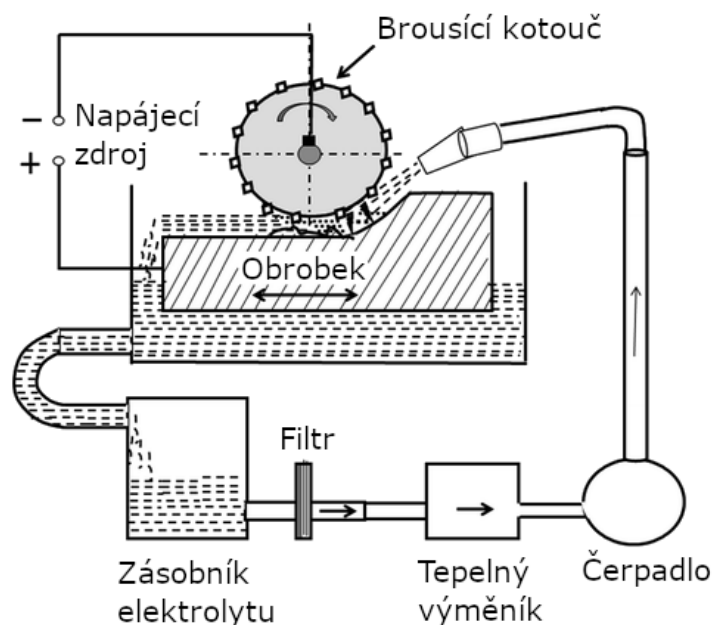
Elektrochemické obrábění je řízený proces oddělování materiálu anodickým rozpouštěním v elektrolytu, jehož podstatou je elektrolyza<sup>4</sup>. Nástroj je připojen k zápornému pólu (tvoří katodu) a obrobek je připojen ke kladnému pólu napětí (tvoří anodu). Mezerou mezi nástrojem a obrobkem proudí elektrolyt. Jeho hlavním úkolem je zajistit vedení el. proudu a odvádět z pracovního prostoru teplo a produkty vzniklé chemickými reakcemi. K tomuto účelu se obvykle používají roztoky anorganických solí (NaCl, NaNO<sub>3</sub>, NaClO<sub>3</sub> a NaOH) nebo kyseliny (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Vzniklé kationty elektrolytu se slučují s anionty kovu a postupně rozrušují povrch obráběné součásti. Tvar nástrojové elektrody se tak kopíruje na obrobek. [8]

Touto metodou lze obrábět i velmi tvrdé, ale pouze elektricky vodivé materiály. Jedná se např. o kalené oceli nebo žárupevné slitiny. Naopak téměř neobrobitelná je šedá litina, slitiny s velkým obsahem uhlíku nebo dural obsahující křemík. [8]

Princip elektrochemického obrábění využívá celá řada různých metod. K těm základním patří podle Kocmana [7] obrábění rotující elektrodou, obrábění v proudícím elektrolytu, leštění a odstraňování otřepů.

#### Obrábění rotující elektrodou

Jedná se o kombinaci klasického broušení a elektrochemického účinku (obrázek 13). Brusná zrna odstraňují oxidační vrstvu, která vzniká v důsledku pasivačních jevů při elektrolytickém rozpouštění. Používají se vodivé brousící kotouče s diamantovými brusnými zrnky v kovové matici. Touto metodou se obrábí zejména nástroje ze slinutých karbidů, materiály vysoké tvrdosti, materiály křehké nebo náchylné k tepelnému poškození, které se nedají brousit klasickými metodami. Do této skupiny lze také zařadit elektrochemické honování. [7]



Obrázek 13 Schéma obrábění rotující elektrodou, upraveno dle [25]

<sup>4</sup> Elektrolyza – Fyzikálně-chemický děj způsobený průchodem elektrického proudu kapalinou. Dochází k rozkladu kapaliny na její jednodušší složky.

## 2 POROVNÁNÍ PAPRSKOVÝCH TECHNOLOGIÍ

Mezi nekonvenční paprskové technologie patří obrábění laserem, vodním paprskem, paprskem plazmy a elektronovým paprskem. V této kapitole jsou zmíněné technologie porovnávány z pohledu metody řezání materiálu. Vhodnost použití jednotlivých technologií závisí na řadě parametrů, jako jsou například:

- Pořizovací cena a náklady spojené s provozem
- Druh obráběného materiálu, jeho vlastnosti a tloušťka
- Požadovaná přesnost a rychlost obrábění
- Technická podpora a servis výrobce
- Dopad na životní prostředí

Ze srovnání lze vyřadit technologii obrábění elektronovým paprskem, protože se používá jen ve velmi specifických případech, a to zejména v letectví a kosmonautice. Co se týče pořizovací ceny, jedná se o nejdražší variantu z porovnávaných technologií. Důvodem je především nutnost vytvoření vakua během obrábění. V běžné strojírenské praxi je tato metoda nahrazována laserem.

Zbylé technologie lze porovnávat jen velmi těžko. Jejich parametry jako je účinnost, rychlost a přesnost obrábění, drsnost povrchu atd. závisí na typu a nastavení stroje, materiálu a tloušťce obrobku a mimo jiné i na zkušenostech obsluhy. Proto má smysl provádět porovnání pouze pro stroje s podobnými parametry při obrábění jednoho typu polotovaru. Takto získaná experimentální data nejsou veřejnosti volně k dispozici a cílem této práce není takto rozsáhlé testování provádět. V následující tabulce (tabulka 3) jsou porovnány parametry vybraných technologií podle hodnot uvedených v odborné literatuře ([8; 15; 7]). Na základě provedené rešerše byly k porovnání vtypovány metody řezání vodním paprskem s příměsí abraziva, řezání CO<sub>2</sub> laserem a řezání plazmou s plynovou stabilizací s transferovým obloukem.

Tabulka 3 Porovnání vybraných technologií paprskového obrábění

Parametry	Vodní paprsek s příměsí abraziva	Plynový CO <sub>2</sub> laser	Plazma s plynovou stabilizací paprsku
Obrobitelný materiál [-]	Široký výběr materiálů	Mimo materiálů s vysokou odrazivostí	Elektricky vodivé materiály
Maximální tloušťka [mm]	více než 100	konstrukční ocel: 20 slitina hliníku: 5	konstrukční ocel: 130 slitina hliníku: 150
Rychlost obrábění [mm·min <sup>-1</sup> ]	5 až 2000	750 až 6000	500 až 7600
Šířka řezu [mm]	0,8 až 1,5	0,02 až 0,2	3 až 10
Drsnost povrchu Ra [μm]	2,5 až 12	3,6 až 12	0,5 až 6
Tepelně ovlivněná oblast [mm]	nevzniká	0,05 až 0,2	0,25 až 1,25

Jako nejuniverzálnější vychází technologie řezání vodním paprskem. S její pomocí lze dělit široké množství různých materiálů i velkých tlouštěk. Zásadní výhodou je také možnost obrábět materiály citlivé na teplo, protože při obrábění nevzniká tepelně ovlivněná oblast. Šířka řezu a dosažená drsnost povrchu je vzhledem k aplikaci obvykle přijatelná. Jedinou nevýhodou je tedy rychlost obrábění. Ta závisí na druhu obráběného materiálu, ale v porovnání s ostatními uvedenými technologiemi je vždy nižší.

Obdobně jako u vodního paprsku, lze i pomocí CO<sub>2</sub> laseru obrábět velké množství různých materiálů. Výjimku tvoří pouze materiály s vysokou odrazivostí povrchu (v praxi se takové materiály potahují fólií, která umožní jejich obrábění). Touto metodou lze dělit materiály s poměrně malou tloušťkou, ale s vysokou rychlostí obrábění a s minimální šířkou řezu. Při obrábění dochází k tepelnému ovlivnění malé oblasti v okolí místa řezu.

Primární nevýhodou řezání plazmou s transferovým obloukem je možnost obrábět pouze elektricky vodivé materiály. Další nevýhodou je vznik tepelně ovlivněné oblasti, která je větší než v případě obrábění laserem. Mezi přednosti této metody naopak patří nízká drsnost obroběného povrchu a vysoká rychlost obrábění.

Řešení problému, jakou ze zmíněných metod použít, není zcela jednoznačné. Finální rozhodnutí záleží vždy na konkrétní aplikaci. Podle zvolených parametrů však nejlépe vychází technologie obrábění vodním paprskem s příměsí abraziva (AWJM).

Stejný problém bude mít jiné řešení z pohledu člověka, který s nekonvenčními metodami obrábění teprve experimentuje a jeho cílem je vyrobit zařízení využívající některou z paprskových metod. Zásadním parametrem je v tomto případě cena. Ta do jisté míry souvisí s celkovou složitostí zařízení. Z tohoto pohledu je vodní paprsek zcela nevhodný. Jako nejlepší varianta se zde jeví lasery, zvláště pak ty polovodičové. Samotný modul laseru je totiž poměrně levný a lze ho snadno uvést do provozu. Je však nutné podotknout, že tento typ laseru nedosahuje srovnatelných parametrů s parametry metod z tabulky 3. Polovodičovým laserem lze kovy maximálně gravírovat. Řezat je možné pouze lehce obrobitelné materiály jako je např. papír, lepenka nebo překližka.

### 3 KONSTRUKCE GRAVÍROVACÍHO LED LASERU

Tato kapitola se zabývá návrhem konstrukce gravírovacího LED laseru a její následnou realizací. Cílem je sestavit funkční zařízení, které bude splňovat předem stanovené požadavky. Primárním účelem zařízení bude výroba stavebnic pro modelovou železnici. Konkrétně se bude jednat o civilní a drážní budovy jako jsou různé domy, nádražní stanice, depa ale i průmyslové objekty. Vyráběné modely budou převážně v měřítku TT (1:120). Tomu je přizpůsobena velikost pracovního prostoru a posléze velikost celého stroje. Dále se předpokládá výroba menších dekorativních předmětů.

Důraz je kladen také na jednoduchost konstrukce. V ideálním případě by se mělo jednat o stavebnicový systém, který umožní snadné úpravy a vylepšení. Do budoucna by pak mohlo být zařízení upraveno a použito k frézování nebo k 3D-tisku.

#### 3.1 Parametry a požadavky

Před samotnou stavbou je nutné stanovit parametry, které musí zařízení bezpodmínečně splňovat. Níže uvedené požadavky jsou stanovené na základě účelu použití, prostorových možností, dostupných výrobních technologií a vlastních preferencí.

##### 1) Velikost pracovního prostoru

Pracovní prostor stroje v rovině XY je požadován o rozměrech alespoň 210 x 297 mm (formát A4). Vzhledem k účelu použití jsou tyto rozměry dostačující. Dalším důvodem je dostupnost polotovarů v tomto formátu. Třetí rozměr (Z) musí umožňovat přestavení laserového modulu za účelem nastavení ideální ohniskové vzdálenosti.

##### 2) Celkový rozměr zařízení

Do značné míry závisí na velikosti pracovního prostoru. Dále se odvíjí od velikosti ovládacího panelu a rozvaděče. Celkové rozměry nesmí přesáhnout půdorysný průmět 600 x 900 mm. Důvodem je záměr umístit zařízení na skříňku těchto rozměrů.

##### 3) Jednoduchost vyráběných součástí

Součásti vyráběné na míru musí být co nejjednodušší s ohledem na výrobu pomocí 3D tisku. Je vhodné tyto součásti navrhnout tak, aby při tisku nebylo zapotřebí podpěr.

##### 4) Kompaktnost konstrukce

Snaha je také o docílení kompaktního designu. Vše potřebné k provozu musí být součástí jedné konstrukce, kterou lze snadno přemísťovat a rychle uvést do provozu. Zde platí výjimka pouze pro řídicí program, který bude spouštěn z externího počítače.

##### 5) Čistota prostředí

Během provozu laseru se mohou do ovzduší uvolňovat látky způsobující zápach nebo látky škodlivé zdraví. Provoz zařízení se předpokládá ve vnitřních prostorech, a proto je nutné vyřešit odsávání zmíněných látek z pracovního prostoru.

##### 6) Bezpečnost

Především je nutné myslet na bezpečnost, a to nejen při provozu. Zařízení bude umístěno v malé dílně, kde se pohybuje více lidí. Je třeba zabránit zranění o vnější kryt či úrazu elektrickým proudem. Při provozu laseru musí zakrytování zabránit úniku paprsku z pracovní komory, aby nemohlo dojít k ozáření obsluhy.

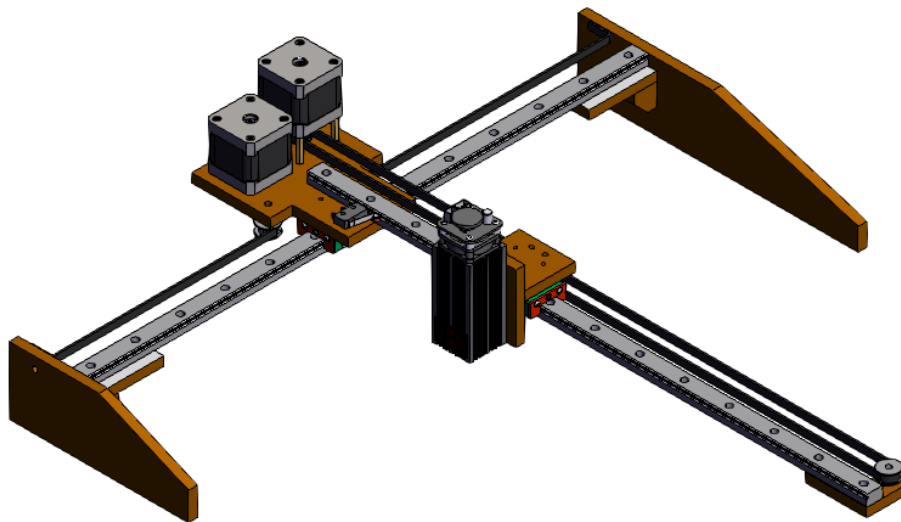


## 3.2 Konceptní řešení

Konstrukce je inspirována skutečnými, komerčně vyráběnými stroji. Základní koncept laserových gravírovacích strojů je stále stejný. Tyto stroje většinou pracují v kartézském souřadném systému a mají dvě nebo tři pohybové osy. Jednotlivé typy lze rozlišit podle způsobu realizace pohybu v těchto osách.

### 3.2.1 Koncept 1

Jedná se pravděpodobně o nejjednodušší řešení daného problému. Stroj je koncipován jako dvouosý (obrázek 14). Pohybuje se tedy pouze v rovině XY. Laserový modul je umístěn nastavitelně v ose Z, ale řízení neumožňuje polohování v tomto směru. Při montáži je nastavena fixní ohnisková vzdálenost, která se po celou dobu trvání obrábění nemění. Modul laseru se pohybuje po rameni, které je pouze na jednom konci spojeno se stojanem. Ten umožňuje pohyb po jezdci v kolmém směru.



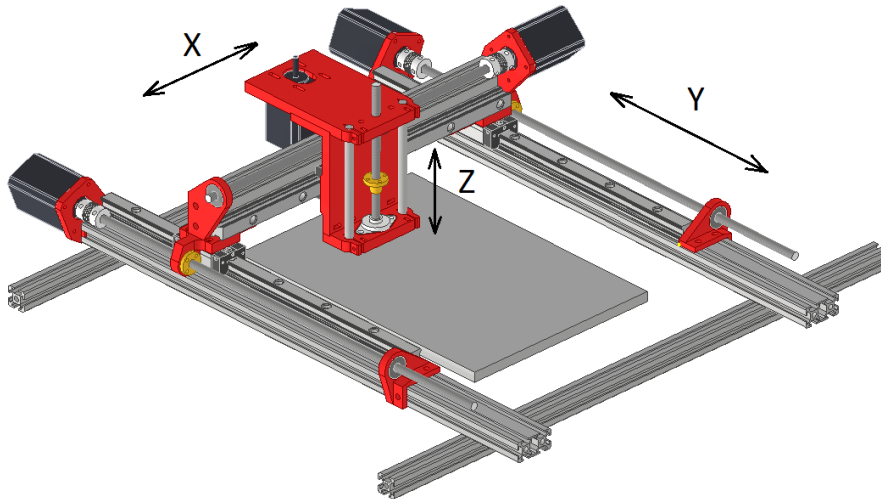
Obrázek 14 Dvouosý gravírovací stroj [26]

Toto řešení má zásadní vliv na celkovou tuhost, která sekundárně ovlivňuje přesnost obrábění. Pro obrábění laserem je tato varianta ještě přijatelná, protože nedochází k přímému kontaktu nástroje s obrobkem, ale pro jiné technologie jako je např. 3D-tisk nebo frézování je toto řešení nevhodné. Dalším omezením je délka letmo uloženého ramene. Při větších rozměrech může docházet k jeho průhybu a lze tak obtížně dodržet konstantní vzdálenost mezi laserovým modulem a obrobkem. To se projeví na kvalitě výrobků, protože bude docházet k rozostřování paprsku.

Realizace pohybu je pro obě osy společná. Využívá se lineárního kuličkového vedení, jehož pohon je řešen pomocí synchronních (ozubených) řemenů. Hlavním důvodem je dosažení co možná nejnižší hmotnosti.

### 3.2.2 Koncept 2

Většina komerčně prodávaných gravírovacích strojů je koncipována jako tříosý, portálový stroj (obrázek 15). Tento typ konstrukce se osvědčil i u jiných technologií jako je např. frézování, řezání vodním paprskem, plazmou atd. Modul laseru se v tomto případě pohybuje po příčnici, který je spojen na obou koncích se stojany. Posun v kolmém směru je realizován pomocí dvou symetricky umístěných pohybových jednotek. Během provozu je možné měnit ohniskovou vzdálenost například při opakovaných průjezdech. Také je možné řezat různé tlusté polotovary.



Obrázek 15 Tříosý gravírovací stroj, první iterace pohybového ústrojí

Takto uzavřená konstrukce dosahuje mnohem větší tuhosti než koncept 1. Nevýhodou je možnost vzpříčení portálu. Tomu lze zabránit správným návrhem osy Y, montáží a řízením motorů. Pohyb v ose Y se dá obecně realizovat více způsoby. Na obrázku je varianta, kdy je každá jednotka poháněná vlastním motorem.

Další variantou je aktivní pohon pouze jedné strany portálu. Druhý konec je unášen po lineárním vedení. Výhodou je snížení počtu potřebných motorů a zjednodušení jejich řízení. Dojde ale ke zvýšení pravděpodobnosti vzpříčení.

Kombinací uvedených variant je pohon obou jednotek pomocí jednoho motoru. Ušetří se tak jeden motor a zároveň se nezvýší pravděpodobnost vzpříčení. K přenosu kroutícího momentu od motoru je však navíc zapotřebí převodu, který musí zaručit synchronní pohyb obou jednotek.

V tomto případě je k přenosu pohybu využito lineárního kuličkového vedení s pohonem pomocí pohybového šroubu a matice. Toto řešení je pro všechny tři osy společné. Lze však použít stejně jako u konceptu 1 pohon pomocí synchronních řemenů nebo tyto způsoby kombinovat.

### 3.2.3 Volba vhodného řešení

Jako vhodné řešení byl zvolen koncept 2 s pohonem osy Y dvěma motory a s realizací pohybu pomocí pohybových šroubů a matic. Za tímto rozhodnutím stojí hned několik důvodů.

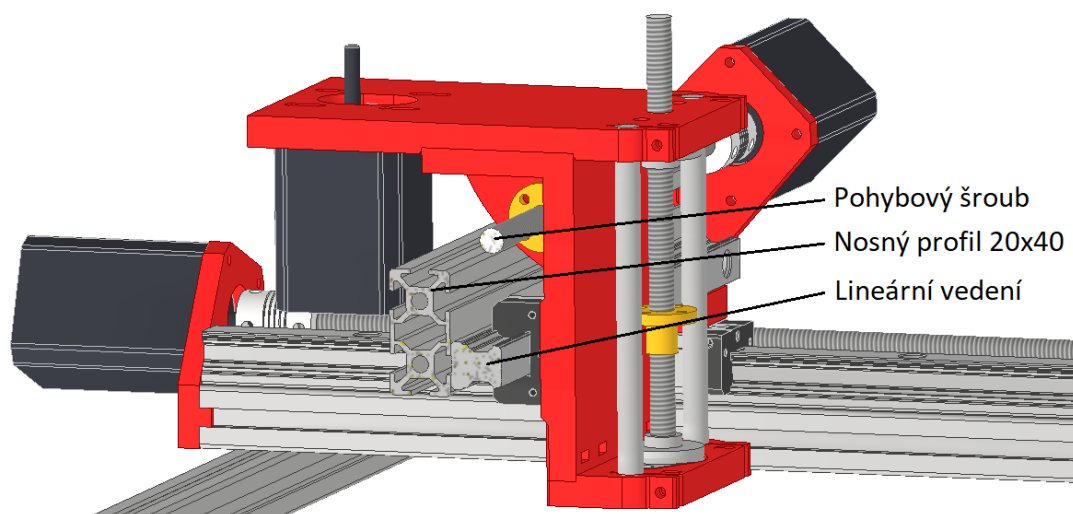
Vzhledem k požadavku na budoucí úpravu zařízení k frézování nebo 3D-tisku, je nutné zajistit dostatečnou tuhost konstrukce. Tomuto požadavku druhé řešení nevyhovuje. Dalším nedostatkem konceptu 1 je absence osy Z, která je pro frézování a 3D-tisk nutností. Ze stejného důvodu je zvolena realizace pohybů pomocí pohybových šroubů. Pro konstrukci laseru by bylo sice vhodnější použití synchronních řemenů, ale opět by došlo ke snížení tuhosti. Nevýhodou zvoleného řešení je nižší posuvová rychlost, což se promítne do strojního času. Výkon diodového laseru lze však snadno regulovat a nemůže tak dojít ke snížení kvality výrobků nadměrným opálením.

Dalším důvodem zvolení portálové konstrukce je nutnost zakrytování celého zařízení. V tomto případě postrádá koncept 1 smysl. Vnější kryt lze totiž využít zároveň k uchycení vedení osy Y. Za rozhodnutím použít k ovládání osy Y dva motory stojí kompromis mezi složitostí konstrukce, cenou a jednoduchostí řízení. Při použití jednoho motoru se zmenší nároky na řízení, ale zvětší se počet mechanických částí. Také je potřeba použít větší a výkonnější motor. Zvolený případ umožňuje použití stejných motorů pro všechny pohony. Řízení ale musí zajistit současný pohyb dvou motorů, protože pokud by došlo k jejich rozhození, hrozí vzpříčení portálu.

## 3.3 Konstrukční řešení

### 3.3.1 První iterace návrhu

Na základě zvoleného konceptu proběhl návrh první verze pohybového ústrojí stroje (obrázek 15). Nosné prvky jsou tvořeny hliníkovými profily, které jsou spojeny díly vyrobenými metodou 3D-tisku (na obrázku červeně). Osy kartézského souřadnicového systému jsou voleny tak, aby vznikl pravotočivý systém. Označení pohybových os číslíkově řízených strojů upravuje norma ČSN ISO 841 [27].

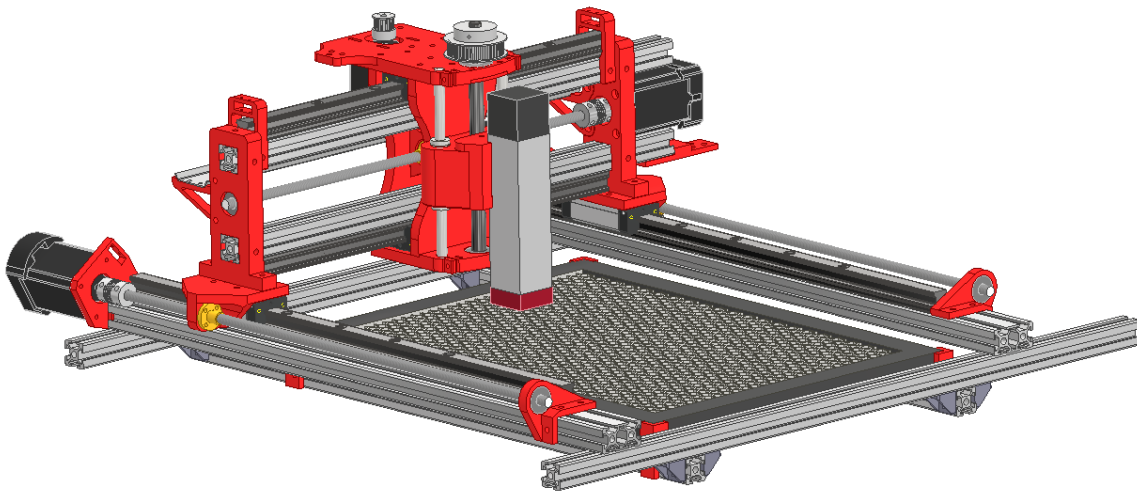


Obrázek 16 Detail řešení příčnicku

Tento návrh byl po konzultaci s vedoucím práce zavrhnut z důvodu malé torzní tuhosti příčnicku. K jejímu zvýšení bylo doporučeno nahradit stávající hliníkový profil dvěma profily oddělenými mezerou. Dalším doporučením bylo použití dvou lineárních vedení a přesunutí pohybového šroubu. Problematická část konstrukce je zobrazena na obrázku 16. Vzhledem k těmto změnám je nutné přepracovat celou konstrukci příčnicku.

### 3.3.2 Druhá iterace návrhu

Druhý návrh odstraňuje předchozí nedostatky (obrázek 17). Příčnick tvoří nově dva nosné hliníkové profily. Ke každému z nich je připevněno jedno lineární vedení. Motor s pohybovým šroubem byl přesunut do vzniklé mezery mezi profily. Změny v konstrukci příčnicku se samozřejmě promítly i do konstrukce pohybové jednotky osy Z. Princip činnosti však zůstal zachován. Pohybové jednotky osy Y zůstaly až na drobné úpravy stejné jako v prvním návrhu. Celá konstrukce je celkově robustnější a její tuhost se zvětšila.



Obrázek 17 Druhá iterace pohybového ústrojí

### 3.3.3 Pohybové jednotky

Pohybová jednotka je mechanismus s jedním stupněm volnosti. Její součástí je motor, spojka, pohybový šroub a matice, ložiska, vedení, snímače polohy atd. Všechny tyto součásti tvoří jeden funkční celek. Celé zařízení je obvykle složeno z více pohybových jednotek, kde každá z nich vykonává jeden dílčí pohyb.

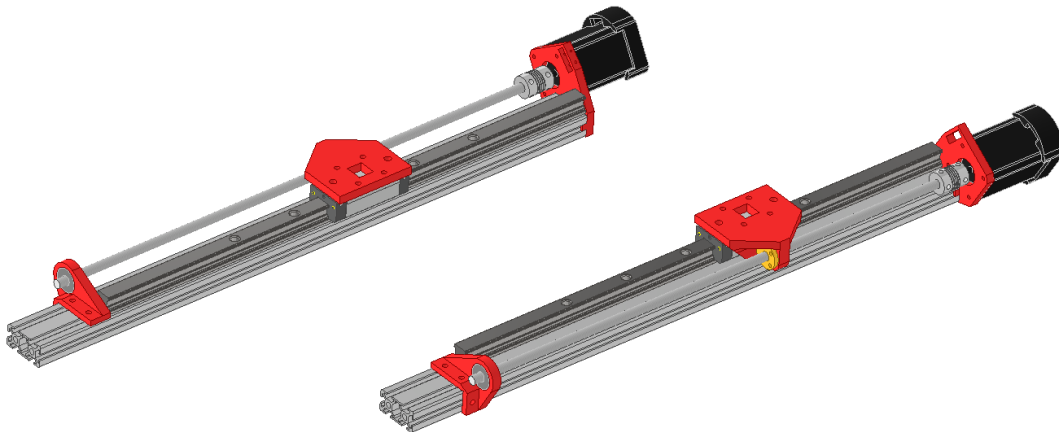
#### Motory

Jako hnací členy všech pohybových jednotek byly zvoleny krokové motory. Tyto motory umožňují přesné polohování hřídele. Klasický motor má 200 kroků na jednu otáčku. Jednomu kroku tak odpovídá pootočení o  $1,8^\circ$ . K řízení se používají řadiče, které umožňují dělení ještě zjemnit. Takto lze docílit  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$  nebo  $1/16$  kroku, což se označuje jako mikrokrokování. Výhodou tohoto typu motorů je možnost přesného řízení bez nutnosti zavedení zpětné vazby v podobě snímače polohy. [28]

Konkrétně byly použity bipolární krokové motory NEMA 17 s 200 kroky na otáčku od výrobce Stepperonline. Pohybové osy X a Y pohání motory s nominálním krouticím momentem 65 N·cm. Pro pohyb osy Z slouží menší motor s krouticím momentem 17 N·cm.

### Pohybové jednotky osy Y

Pohyb v ose Y je realizován pomocí dvou zrcadlově symetrických jednotek (obrázek 18). K transformaci rotačního pohybu na translační dochází pomocí šroubového spoje. K tomuto účelu je použit dvouchodý, trapézový, pohybový šroub průměru 8 mm s roztečí 2 mm a se stoupáním šroubovice 4 mm. Motor je se šroubem spojen přes spojku a přenáší tak na něj krouticí moment. Matice je pevně spojena s vozíkem lineárního vedení. Otáčením šroubu se vozík s maticí posouvá.



Obrázek 18 Pohybové jednotky osy Y

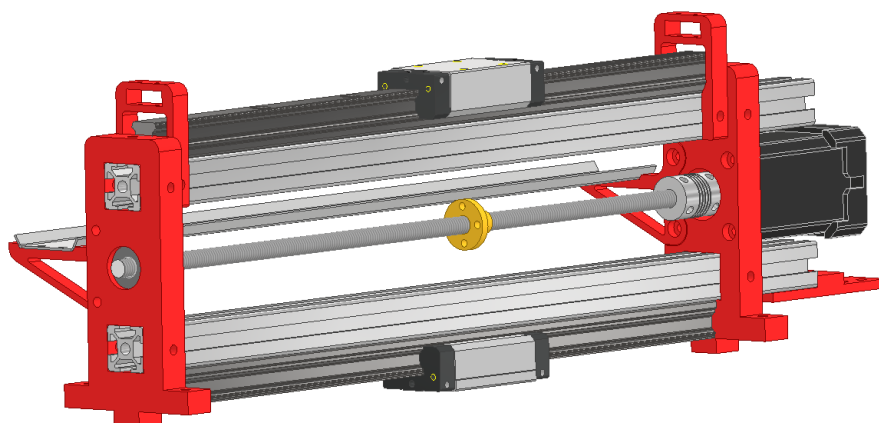
Aby byla vymezena vůle v závitu, je matice složená ze dvou dílů, mezi kterými je pružina. Mezi motorem a šroubem byly nejprve použity pružné spojky, ale z důvodu axiální vůle byly později vyměněny za pevné. Díky těmto opatřením je tzv. mrtvý chod<sup>5</sup> prakticky nulový.

Opěrné ložisko určené k uložení konce pohybového šroubu muselo být při realizaci odstraněno. Přesnost montáže a vytištěných dílů nezaručila souosost s motorem a maticí. Při pohybu se začala konstrukce pohybové jednotky kroutit a na koncích šroubu byl kladen pohybu velký odpor, což způsobovalo ztrátu kroku motoru.

### Pohybová jednotka osy X

Funguje na stejném principu jako jednotky osy Y. Mimo umožnění pohybu v ose X, slouží k propojení ostatních jednotek. Matice je spojena s vozíky lineárního vedení přes těleso osy Z a sloupy jsou sešroubovány s vozíky osy Y (obrázek 19). Konstrukce navíc obsahuje držák energetického kabelu, kterým povedou vodiče k laseru, motoru a koncovým snímačům osy Z.

<sup>5</sup> Mrtvý chod – pohyb mechanismu, který není funkční ale obvykle nežádoucí vzniklý vlivem vůlí nebo opotřebení.

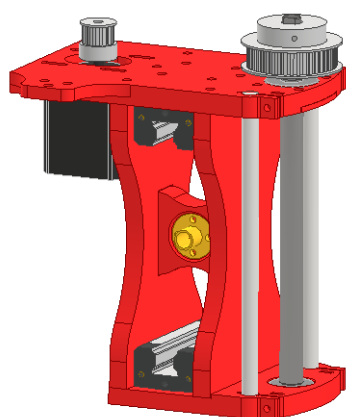


Obrázek 19 Pohybová jednotka osy X

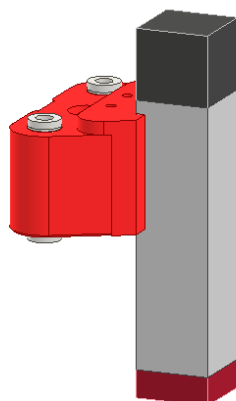
### Pohybová jednotka osy Z

Transformace rotačního pohybu na translační je opět docílena pomocí šroubového spoje. Tentokrát je však použit kuličkový šroub. Lineární vedení je realizováno pomocí lineárních ložisek pohybujících se po ocelové hlazence.

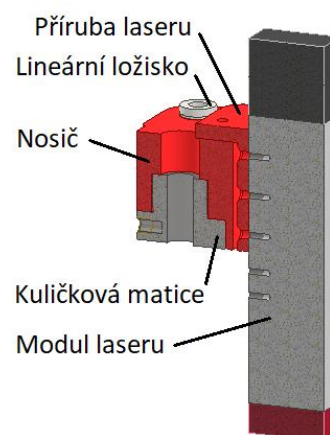
Mezi motor a kuličkový šroub je z několika důvodů vložen převod synchronním řemenem (obrázek 20a). Jedním z nich je úspora prostoru. Dalším je požadavek na přesné nastavení ohniskové vzdálenosti laseru. Toho je možné docílit převodem „do pomala“. Jeden krok motoru pak odpovídá menšímu posunutí kuličkové matice. Díky tomuto převodu lze také použít k pohonu motor s menším kroutícím momentem. Takový motor je levnější a má menší rozměry.



a) Příčné vedení



b) Modul laseru



c) Řez modulem laseru

Obrázek 20 Pohybová jednotka osy Z

Laserový modul je přišroubován k přírubě, která drží v nosiči pomocí rybinové drážky a proti uvolnění je pojištěna dvojicí šroubů (obrázek 20b a 20c). Laser je tedy možné jednoduše odejmout a nahradit ho jiným nástrojem.

Pro toto zařízení byl zvolen modrý laser s vlnovou délkou 450 nm a příkonem 40 W. Důležitým parametrem při výběru je i hladina napájecího napětí, na které laser funguje. V zařízení je rozvod 24 V sloužící pro napájení krokových motorů a je tedy vhodné použít stejnou hladinu napětí i pro modul laseru.

### 3.3.4 Rám a vnější kryt zařízení

Rám stroje je postaven ze stavebnicového systému Bosch Rexroth. Použity jsou hliníkové profily 20x20 mm, které jsou spojovány pomocí úhelníků (obrázek 21). Profily lze objednat nařezané přímo na míru a montáž je tak snadná a poměrně rychlá. Výhodou spojování úhelníky je možnost drobných změn jako je např. posunutí vzpěr. Největším problémem je dodržení kolmosti, protože úhelníky nespírají pravý úhel. Naštěstí na kolmost a rozměrovou přesnost rámu nejsou kladeny tak vysoké nároky jako v případě pohybového ústrojí. To je do rámu stroje vloženo a uchyceno pouze na čtyřech bodech. Při montáži je tak možné srovnat pracovní desku do vodorovné polohy (obrázek 22).



Obrázek 21 Rám stroje s rozvaděčem



Obrázek 22 Rám stroje s vloženým pohybovým ústrojím

Rám zároveň slouží k uchycení rozvaděče. Ten je od pracovního prostoru oddělen plechovou přepážkou. K odsávání zplodin jsou určeny tři dvanáctivoltové ventilátory. Dva z nich jsou umístěny po stranách rozvaděče a vhání vzduch dovnitř pracovní komory. Třetí ventilátor je na protějším, zadním rohu a tlačí vzduch do polyuretanové hadice, která odvádí během obrábění zplodiny ven z místnosti.

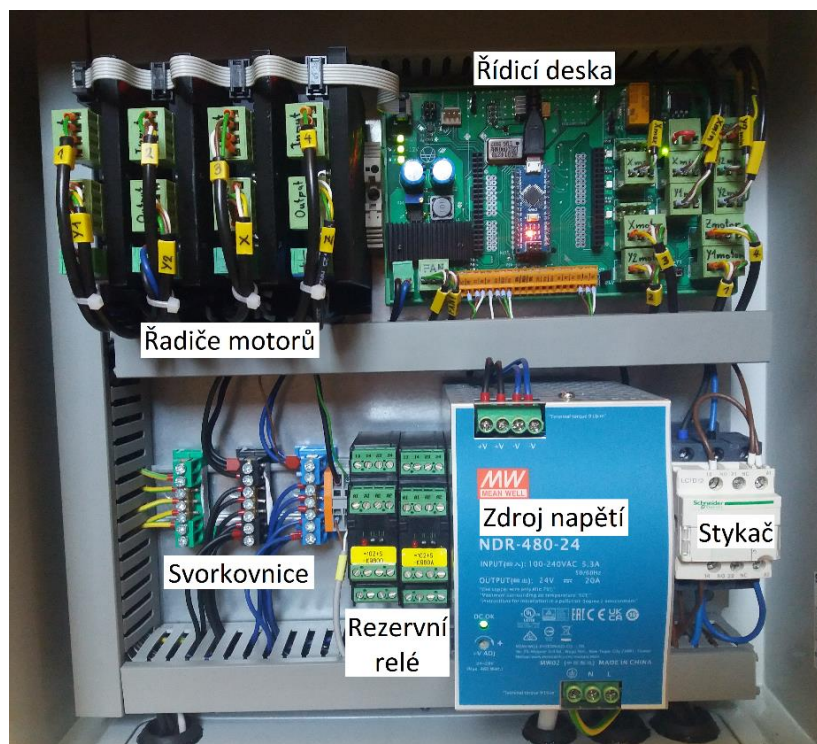
Stěny rámu jsou až na výjimky zakrytovány pozinkovaným ocelovým plechem tloušťky 0,5 mm. Důvodem jeho použití je snaha zabránit úniku laserového záření z pracovního prostoru stroje. Na pravé přední straně zařízení je umístěn ovládací panel se start-stop systémem a jinými funkčními tlačítky. Proto je zde použit silnější, nerezový plech tloušťky 1,5 mm. Nemůže tak dojít k prohnutí plechu např. při nouzovém vypínání stroje pomocí central stopu.

Aby bylo možné v průběhu obrábění průběžně kontrolovat situaci v pracovním prostoru, jsou bezpečnostní dveře průhledné. Dveře jsou vyrobené na míru z černého plexiskla tloušťky 5 mm s označením 7C83/GS. K rámu stroje jsou uchyceny pomocí dvou pantů a pro snadnou manipulaci jsou vybaveny madlem. K přidržení dveří v zavřené poloze slouží dvě magnetické úchytky. V otevřené poloze je drží dvě opěrky. Použité plexisklo sice značně blokuje laserové záření, ale nemá k tomuto účelu potřebnou certifikaci. Doporučuje se tedy nosit při provozu stroje ochranné brýle i v případě zavřených dveří.

### 3.4 Řízení

K oživení stroje je nutné zvolit řídicí desku, firmware<sup>6</sup> a ovládací program. Možností volby je více a žádnou z nich nelze označit za špatnou. K řízení tohoto stroje je použito Arduino NANO. Hlavním důvodem rozhodnutí je zkušenost s touto platformou. Do mikroprocesoru Arduina je nahrán GRBL firmware, který je mezi tvůrci velmi oblíbený. Je volně stažitelný a umožňuje velké množství funkcí. Nyní je možné zařízení řídit pomocí příkazů napsaných v programovacím jazyku zvaném G-kód. Tento jazyk se používá pro stroje pohybující se v kartézském souřadném systému. Pomocí G-kódu je vytvořen tzv. NC program, který lze napsat ručně nebo vygenerovat pomocí programu v počítači. Pro lasery je oblíbený volně stažitelný LaserGRBL, který umožňuje vytvoření NC programu z obrázků a fotek s různými příponami. S jeho pomocí se lze také spojit s Arduinem a vygenerované příkazy přímo interpretovat. Další možností, jak získat NC program, je využít CAM procesoru např. aplikace Inventor Professional. Takto lze na G-kód převést různé 3D modely. Ke komunikaci se strojem je ale nutné opět využít LaserGRBL nebo např. UGS (Universal G-code Sender).

Všechny elektrické komponenty jsou uloženy v plechové rozvodné skříni (obrázek 23). Zařízení je napájeno z jednofázové sítě 230 VAC. Hlavní přívod je přiveden na stykač start-stop systému, jehož ovládání je vyvedeno na ovládací panel. Za stykačem následuje jistič na 10 A s charakteristikou odepnutí "B" (pro běžné spotřebiče), z důvodu dodržení selektivity jištění. Další komponentou je zdroj, který mění napětí na 24 VDC. Ze svorkovnic je poté napětí přivedeno k dalším prvkům obvodu.

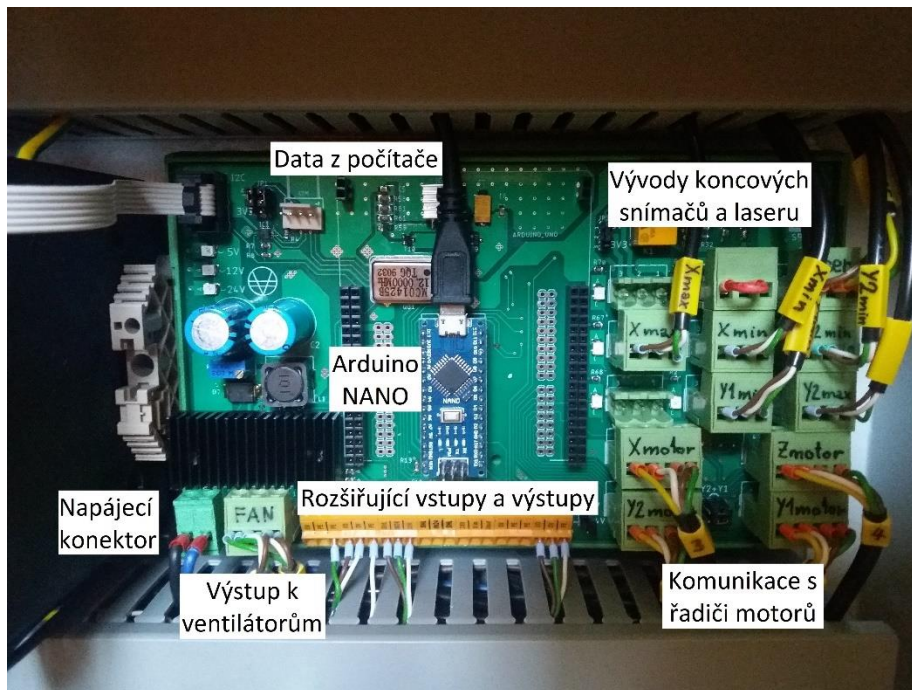


Obrázek 23 Pohled do rozvaděče

<sup>6</sup> Firmware – program (software) pro vestavěné zařízení s jednoúčelovým využitím. Termín firmware se používá především ve spojení se systémy IoT a MBed



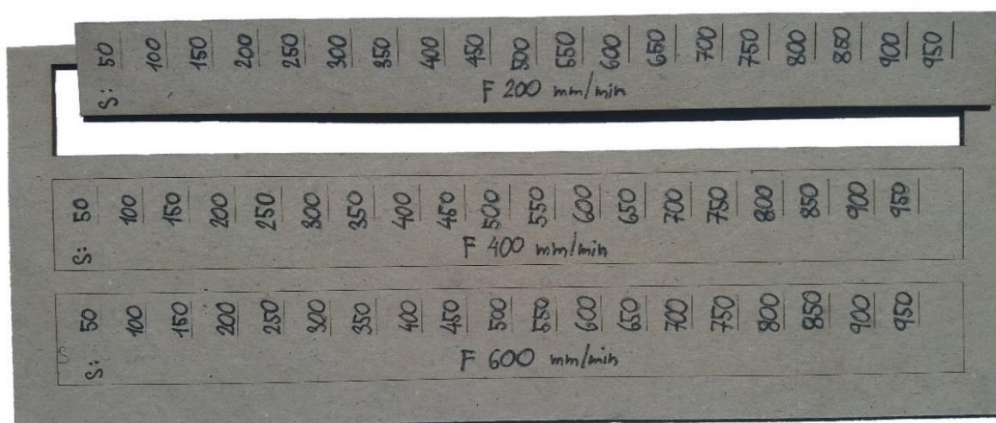
Mozkem celého stroje je řídicí deska (obrázek 24), která byla navržena konkrétně pro toto zařízení. Deska slouží k propojení vstupů a výstupů zvoleného mikroprocesoru se svorkovnicemi a konektory, které jsou již vhodné pro napojení s kabeláží stroje. Zároveň jsou zde výstupní signály proudově posilovány, aby dokázali napájet periferie, jako jsou vstupy řadičů pro krokové motory, nebo samotný laser. Výhodou této řídicí desky je její univerzálnost. Arduino NANO je možné vyměnit za Arduino UNO nebo STM32 nucleoboard. Při použití posledního jmenovaného je možné využít rozšířené funkce, které Arduino nepodporuje. Jedná se například o regulaci otáček ventilátorů, nebo nastavení proudového omezení motorům.



Obrázek 24 Řídicí deska

### 3.5 Testování

Schopnost prototypu gravírovat a rezat byla testována na kartonářské lepence tloušťky 1,5 mm. Cílem testu bylo určení vhodných parametrů obrábění. K tomuto účelu byl speciálně navržen testovací vzorek (obrázek 25).

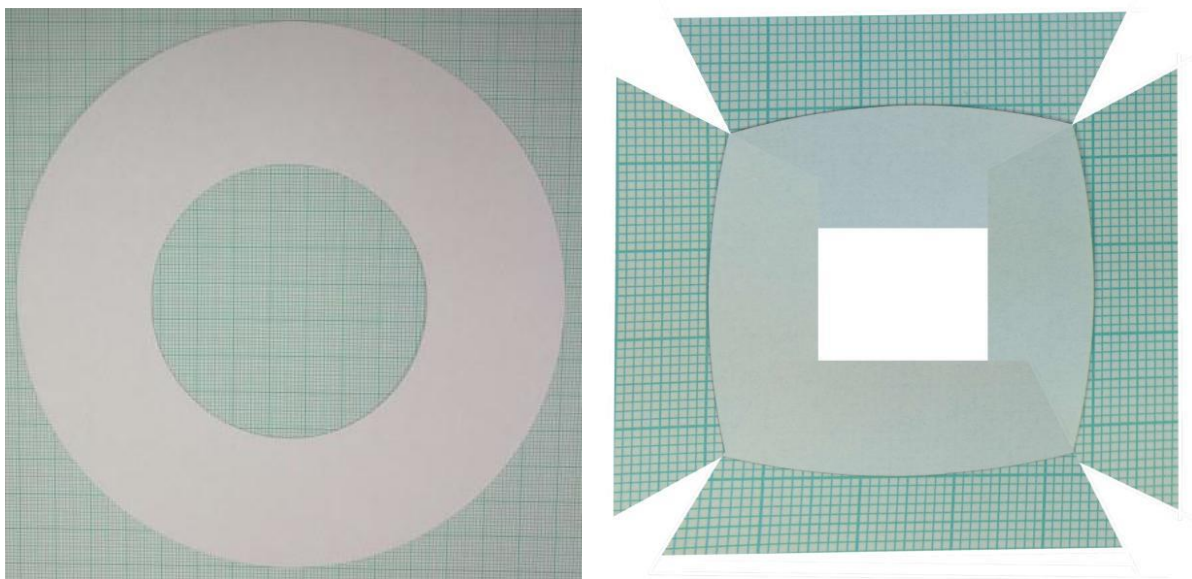


Obrázek 25 Testovací vzorek

Pro každý vzorek byla nastavena jedna konstantní posuvová rychlost. Výkon laseru se měnil v procentuálním rozsahu od 5 do 95 %. Na vzorku je tato hodnota uvedena v desetinásobku procent, protože tak je zapsána v G-kódu u parametru S.

Z testu vyplynulo, že lepenka lze gravírovat i při vysokých posuvových rychlostech a nízkém výkonu. Úpravou těchto dvou parametrů je možné dosáhnout různého kontrastu výpalku. Naopak proříznutí bylo dosaženo až po snížení rychlosti posuvu na  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a nastavení výkonu laseru minimálně na 50 %.

Ze stejného polotovaru byly poté vyrobeny první výrobky, které měly za cíl prověřit přesnost pohybů v osách X a Y. Dosažené výsledky předčily očekávání. Největším překvapením bylo dosažení vysoké přesnosti kruhovitosti obrysu vánočních ozdob (obrázek 28). Kruhovitosť proto byla ještě dále zkoumána. K jejímu ověření byl navrhnut test, jehož podstatou je vizuální srovnání vzorku s políčky milimetrového papíru. Kruh o průměru 150 mm byl vyříznut z bílého kancelářského papíru. Rychlost pracovního posuvu byla nastavena na  $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a výkon laseru na 18 %. Vyrobený vzorek byl umístěn na milimetrový papír tak, aby jeho obvod tvořil vepsanou kružnici libovolného čtverce mřížky (obrázek 26). Otáčením kruhu okolo jeho středu se vizuálně zkontroluje průměr na více místech. Na této rozlišovací úrovni byla stanovena úchylka kruhovitosti rovna nule. Pro účel využití tohoto zařízení je zvolená metoda měření dostačující.



a) Celkový pohled

b) Detail

Obrázek 26 Test kruhovitosti

Jak již bylo několikrát zmíněno, zařízení bude primárně sloužit k výrobě stavebnic pro modelovou železnici. K účelu testování byla vytvořena jednoduchá stavebnice, která měla za úkol ověřit možnost jejího složení (obrázek 27). Test dopadl úspěšně. Obrisy jednotlivých dílů byly obrobena bez korekce nástroje. Rozměry se tak změnilo o šířku řezu, čímž vznikla dostatečná vůle mezi zámky a díly bylo možné spasovat bez dodatečných úprav.



Obrázek 27 Spleená stavebnice jednoduchého domečku



Obrázek 28 Vánoční ozdoba (deformace tvaru je způsobena perspektivou)

Příkladem gravírování může být například pivní podtácek vyrobený z korku (Obrázek 29). Tento materiál se gravíruje poměrně dobře, ale proříznutí je možné až po několika průjezdech. K získání oboustranně gravírovaného výrobku je nejprve nutné vygravírovat první stranu a vyříznout obrobek z upnutého polotovaru. Výrobek se poté otočí a vloží zpět do otvoru v polotovaru. Tak je zajištěna stejná poloha a lze začít gravírovat z druhé strany.



a) líc



b) rub

Obrázek 29 Korkový podtácek

## 4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Při návrhu a stavbě byl kladen důraz především na funkčnost, kvalitu a celkovou spolehlivost prototypu. Cena nebyla vždy nejdůležitějším parametrem ovlivňujícím výběr použitých komponent. Cílem bylo sestrojít zařízení, které bude co nejlépe splňovat požadavky uvedené v kapitole 3.1. Výsledky práce jsou s nimi porovnány níže.

### 1) Velikost pracovního prostoru

Pracovní prostor je definován použitým voštinovým stolem, jehož rozměry jsou 350 x 250 mm. Skutečný rozsah pohybu v osách X a Y je však mírně větší. Každopádně formáty A4 lze bez problému obrábět. Rozsah pohybu v ose Z je zhruba 75 mm, což umožňuje dostatečnou variabilitu při nastavování ohniskové vzdálenosti.

### 2) Celkový rozměr zařízení

Vnější rozměry krytu jsou 600 x 900 x 490 mm a zařízení je tedy možné umístit na zamýšlenou skříňku. Splnění tohoto požadavku se ale v průběhu řešení ukázalo jako velice obtížné. Půdorysný průmět stroje je dán pracovní komorou a prostorem určeným pro rozvaděč. Velikost pracovní komory nelze příliš měnit, neboť přímo závisí na velikosti pracovního prostoru. Ke splnění požadavku bylo tedy nutné zmenšit především prostor pro rozvaděč. Rozvaděč byl nakonec použit nejmenší možný, který ještě pojme všechny potřebné komponenty.

### 3) Jednoduchost vyráběných součástí

Složitost tisknutých dílů je různá, ale všechny je možné vyrobit bez použití podpěr.

### 4) Kompaktnost konstrukce

Vše potřebné k provozu je součástí jednoho celku. Přívodní vodič a hadici k odsávání spalin je možné při transportu uschovat v pracovním prostoru stroje. Připojení externího počítače k zařízení je vyřešeno konektorem USB. Při přepravě je největší nevýhodou poměrně vysoká celková hmotnost (44 kg). Zařízení bylo proto dodatečně vybaveno kolečky.

### 5) Čistota prostředí

Odsávání spalin z pracovní komory zajišťuje trojice ventilátorů. Jejich spuštění inicializuje program nebo je lze zapnout ručně z ovládacího panelu. Vývod vzduchu je v zadní části stroje a je napojen na flexibilní polyuretanovou hadici, která odvádí spaliny ven z místnosti.

### 6) Bezpečnost

K zajištění bezpečnosti při práci na stroji slouží několik bezpečnostních prvků. Úniku laserového záření ven z pracovní komory je bráněno krytováním. Na stěny je použit ocelový plech, dno je z překližky a dveře jsou z plexiskla. Jelikož je dno vyrobené z hořlavého materiálu, je pod pracovním prostorem laseru ještě navíc umístěn nerezový plech. V budoucnu ale bude překližka pravděpodobně nahrazena jiným materiálem. Schopnost plexiskla blokovat laserové záření se ukázala jako nedostatečná. Z tohoto důvodu je nutné při provozu stroje používat ochranné brýle. Na nošení ochranných pomůcek a na nebezpečí ozáření upozorňují výstražné tabulky umístěné na vnějším krytu stroje. Dalším bezpečnostním prvkem je nouzový vypínač, který slouží k okamžitému odepnutí hlavního přívodu elektrické energie. Do budoucna se uvažuje o přidání bezkontaktního snímače, který bude hlídat, zda jsou během obrábění zavřené dveře. V případě jejich nečekaného otevření by poté došlo k přerušování probíhající činnosti.

Z výše uvedených bodů vyplývá, že sestavený prototyp (obrázek 30) předem stanovené požadavky až na drobné výhrady splňuje. Zařízení pracuje spolehlivě a při testování prokázalo vysokou přesnost a opakovatelnost pohybů. Z technického hlediska lze zařízení hodnotit jako povedené.



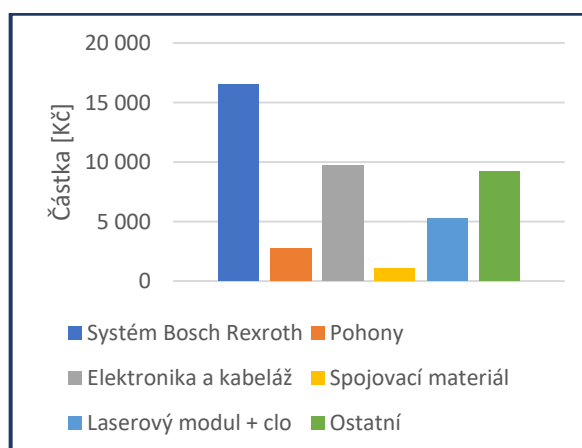
Obrázek 30 Celkový pohled na zařízení připravené k obrábění

Z ekonomického hlediska stavba tak úspěšná není. Celková investovaná částka je v porovnání s podobnými komerčně prodávanými stroji více než dvojnásobná. Podrobné srovnání s konkurencí je uvedeno v následující kapitole.

Pro jednoduchost byly všechny zakoupené komponenty rozřazeny do šesti skupin (tabulka 4). Jejich podíly na celkovou cenu zobrazuje graf 1. Nejdražší položkou je stavebnicový systém Bosch Rexroth, ze kterého je postaven rám stroje. Výhodou tohoto systému je ale jeho univerzalita a pozdější možnost úprav.

Tabulka 4 Celkové náklady na stavbu

Skupina	Částka [Kč]
Systém Bosch Rexroth	16 531
Pohony	2 746
Elektronika a kabeláž	9 742
Spojovací materiál	1 037
Laserový modul + clo	5 280
Ostatní	9 223
<b>Celkem</b>	<b>44 559</b>



Graf 1 Podíl skupin na celkovou cenu

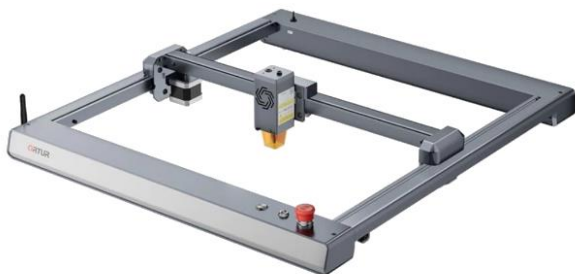
## 5 POROVNÁNÍ S KOMERČNÍM LASEREM

Největší výhodou vyrobeného prototypu je uzavřená pracovní komora s aktivním odsáváním zplodin. Většina komerčně prodávaných laserů totiž tuto komoru nemá. Pořizovací cena takovýchto zařízení je pak několikanásobně menší, ale to na úkor snížení bezpečnosti a pohodlí. K vzájemnému porovnání parametrů byl proto zvolen gravírovací stroj Ortur Laser Master 3 (obrázek 31). K tomuto modelu lze totiž dokoupit zmíněný kryt s odsáváním (obrázek 32). Rozměry a jiné parametry jsou si také podobné (tabulka 5).

Tabulka 5 Parametry porovnávaných zařízení [29]

Parametry zařízení	Ortur Laser Master 3 + Ortur Enclosure	Vlastní prototyp
Velikost pracovního prostoru [mm]	400 x 400	350 x 250
Celkové rozměry zařízení [mm]	720 x 700 x 370	900 x 600 x 500
Celková hmotnost [kg]	9,1	44
Vlnová délka laseru [nm]	455	450
Optický výkon laseru [W]	10	25
Bezpečnostní třída laseru [-]	4	3B
Napájecí napětí [V]	AC 220–240	AC 220–240
Maximální gravírovací rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	20 000	2200
Pořizovací cena [Kč]	25 500	44 559
Ovládací software [-]	LaserGRBL	LaserGRBL
Zpracovávaný materiál [-]	vše včetně kovu a kamene	překližka, lepenka, korek, karton

Po porovnání parametrů těchto dvou strojů je jasným vítězem komerčně prodávaný Ortur Laser Master 3. Zařízení dosahuje lepších parametrů a lze ho pořídit za zhruba poloviční cenu. Výrobce také uvádí možnost gravírování do kovu a kamene. Toto tvrzení je ale vzhledem k optickému výkonu laseru diskutabilní.



Obrázek 31 Ortur Laser Master 3 [29]



Obrázek 32 Ortur Enclosure [29]

## ZÁVĚR

Velká část této práce se zabývá nekonvenčními metodami obrábění, jejich rozdělením a popisem základních principů. Uvedeny jsou také možnosti jejich aplikace a využití ve strojírenské praxi. Zvláštní pozornost je věnována paprskovým technologiím. V samostatné kapitole jsou proti sobě postaveny výhody a nevýhody těchto metod s cílem určit tu nejlepší. Závěr je však poněkud znepokojující, protože takovéto rozhodnutí učinit nelze. Přesto je jako nejuniverzálnější technologie zvolena metoda obrábění vodním paprskem s příměsí abraziva. Vzápětí je ale označena jako nevyhovující pro svépomocí vyráběné stroje. K tomuto účelu je jako nejvhodnější technologie vybrána metoda obrábění polovodičovým laserem.

Druhá část práce je poté zaměřena na návrh a konstrukci zařízení využívající k obrábění právě zmíněný LED laser. Při návrhu byl kladen důraz především na funkčnost a celkovou spolehlivost. Hlavním úkolem bylo splnit předem stanovené požadavky, které mají zásadní vliv na výslednou podobu zařízení. Dosažené výsledky jsou poté podrobně diskutovány ve čtvrté kapitole.

Sestrojený prototyp všechny požadavky až na drobné výhrady splňuje. Zařízení pracuje spolehlivě a při testování prokázalo vysokou přesnost a opakovatelnost pohybů. Asi jedinou nevýhodou je celková cena zařízení, která se blíží ke 45 tisícům korun. Za zhruba poloviční pořizovací cenu lze totiž na trhu sehnat zařízení, u kterého výrobce uvádí lepší parametry, než má vyrobený prototyp. Závěrem lze ale i tak říci, že navržené zařízení je velmi povedené.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. Nekonenční metody. In: *Technologie obrábění v příkladech* [online]. První. Ostrava: Vysoká škola Báňská – technická univerzita Ostrava, 2013, s. 100-109 [cit. 2023-05-12]. ISBN ISBN 978-80-248-3014-8. Dostupné z: [https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_003/Technologie%20obrabeni%20v%20p%C5%99%C3%ADkladech.pdf](https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_003/Technologie%20obrabeni%20v%20p%C5%99%C3%ADkladech.pdf)
- [2] SLANÝ, Martin, Jana DVOŘÁKOVÁ a Jaromír DVOŘÁK. Nekonenční technologie obrábění. *TECHMAGAZÍN* [online]. 2015 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/2332>
- [3] KEREČANINOVÁ, Zuzana a Jaroslav ŘASA. Nekonenční metody obrábění – 3. díl: Obrábění ultrazvukem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, (12) [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenčni-metody-obrabeni-3-dil>
- [4] SEDLÁK, Josef. ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE VUT V BRNĚ. *Vybrané nekonenční metody obrábění: Technologie obrábění - DTB*. Brno, 2021. Prezentace ke studiu.
- [5] FORMAN, Vojtěch. *Ultrazvukové obrábění*. Praha, 2017, 27 s. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Pavel Novák, Ph.D.
- [6] SOLANKI, Jay. Ultrasonic Machining. In: *MECHANICALFUNDA* [online]. Indie, 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.mechanicalfunda.com/2016/12/ultrasonic-machining.html>
- [7] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [8] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3. 2. díl, Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. 1. vydání. Praha: Scientia, 2001, 221 stran : ilustrace ; 21 cm. ISBN 80-7183-227-8.
- [9] VISWANATH, J., Ch. LAKSHMI TULASI a K. ANAND BABU. Optimizing the process parameters of AWJM using Taguchi method and ANOVA on Inconel 625: Abrasive water jet cutting machine. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* [online]. 2018, **2018**(5), 3 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: [http://www.arnpjournals.com/jeas/volume\\_05\\_2018.htm](http://www.arnpjournals.com/jeas/volume_05_2018.htm)
- [1] BOISSONNEAULT, Tess. Electrical Discharge Machining (EDM): Everything you need to know. In: *Wevolver* [online]. 2021 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/electrical-discharge-machining-edm-everything-you-need-to-know>
- [1] WEEKS, Gareth. Wire EDM (Wire Electro Discharge Machining). In: *Engineeringclicks* [online]. 2011 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/wire-edm/>
- [1] KOLAŘÍK, Ladislav, Ladislav KOLAŘÍK, Petr VONDROUŠ, Karel KOVANDA a Jaroslav MÁLEK. Elektronové svařování: perspektivní metoda pro speciální materiály. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2016, (2) [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektronove-svarovani-perspektivni-metoda-pro-specialni-materialy>
- [1] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění - 6. díl: Obrábění paprskem elektronů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2008, (6) [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenčni-metody-obrabeni-2>



- [1] OKADA, Akira. Electron Beam Machining. CHATTI, Sami, Luc LAPERRIÈRE,  
4] Gunther REINHART a Tullio TOLIO. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2019 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-662-53120-4\\_6480](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53120-4_6480)
- [1] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění. II, obrábění laserem, plazmou, 5] ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem*. 1. vydání. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016, 117 stran : ilustrace, grafy. ISBN 978-80-248-3944-8.
- [1] KUSALA, Jaroslav. Lasery kolem nás: Princip laseru. In: *ČEZ* [online]. 2004 [cit. 2023-6] 05-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
- [1] Laser. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia 7] Foundation, 2001 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [1] ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM 8] publishing, 2008, (7) [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl>
- [1] JUREK, Martin. CO2 lasery. In: *JurekDESIGN* [online]. Ostrava Pustkovec [cit. 2023-9] 05-20]. Dostupné z: <https://jurekdesign.cz/teorie/co2-lasery/>
- [2] ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem: 0] Polovodičové lasery. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, (7) [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>
- [2] Laserová dioda zelená. In: *Conrad* [online]. Praha [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: 1] <https://www.conrad.cz/cs/p/laser-components-laserova-dioda-zelena-520-nm-10-mw-1782885.html>
- [2] FRÝDL, Jiří. *Obrábění plazmou* [online]. Praha, 2021 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: 2] <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/97155>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Pavel Novák.
- [2] Plasma arc cutting. In: *The Open University* [online]. Milton Keynes (Anglie) [cit. 2023-3] 05-21]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/plasma-arc-cutting>
- [2] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 8. díl: 4] Obrábění paprskem iontů – plazmatem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, (10) [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>
- [2] GUPTA, K., N. JAIN a R. LAUBSCHER. Electrochemical Hybrid Machining Processes. 5] In: *Hybrid Machining Processes: Perspectives on Machining and Finishing* [online]. 1. Springer, Cham, 2016 [cit. 2023-05-22]. ISBN 978-3-319-25920-8. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-25922-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25922-2_2)
- [2] DEJAN. Simple CNC Machine: DIY Laser Engraver. In: *How To Mechatronics* [online]. 6] [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/projects/simplest-cnc-machine-with-minimum-parts-possible-diy-laser-engraver/>
- [2] ČSN ISO 841. *Systémy průmyslové automatizace a integrace - Číslicové řízení strojů - 7] Souřadnicový systém a terminologie pohybu*. Leden 2003. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [2] Krokový motor: Druhy a příklady aplikací krokových motorů. In: *TME* [online]. Łódź, 8] Polsko [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/41861/krokovy-motor-druhy-a-priklady-aplikaci-krokovych-motoru/>

- [2] Ortur Laser Master 3. In: *Fotověci* [online]. Praha, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z:  
9] <https://www.fotoveci.cz/ortur-enclosure-kryt-odvetravani-pro-laserove-gravirovani-720-x-700mm/>