



**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 MANUFACTURE OF AN ENGRAVING LED LASER

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jiří Vodička

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

**BRNO 2022**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Jiří Vodička**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22

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

## Návrh a zhotovení gravírovacího LED laseru

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a zhotovení prototypu gravírovacího LED laseru.

### Cíle bakalářské práce:

Zhodnotit současný stav nekonvenčních technologií obrábění.

Porovnat vlastnosti paprskových nekonvenčních technologií.

Navrhnout prototyp gravírovacího LED laseru.

Porovnat výkonnost a přesnost navrženého prototypu oproti konvenčním 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, 2vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7.

PILOUS, V. Materiály a jejich chování při svařování, 1 vyd. Škoda-welding, Plzeň, 2009.

TURŇA, M. Speciálne metódy zvráania, 1 vyd. ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-000097-9.

KOUKAL, J. a KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1 vyd. Zeross, Ostrava 2001, ISBN 80-85771-85-3.

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

BARTÁK, J. a KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, ISBN 80-85771-72-1.

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

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá současným stavem, principem a využitím nekonvenčních technologií obrábění. Dále zahrnuje návrh a sestavení prototypu gravírovacího laseru, přičemž byl kladen důraz na jednoduchost a funkčnost. Bylo snahou seznámit s postupem gravírování nejen zájemce o tuto činnost, ale zpřístupnit prototyp a jeho používání každému se základním povědomím o CNC řízení. Po dokončení došlo k testu na základních materiálech a výsledná kvalita gravírování je v práci vyhodnocena.

### **Klíčová slova**

nekonvenční technologie obrábění, LED laser, gravírování, gravírovací laser, CNC

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the current state, principle and use of unconventional machining technologies. It also includes the design and assembly of a engraving laser prototype, with an emphasis on simplicity and functionality. It was an effort to acquaint not only those interested in this activity with the engraving procedure, but also to make the prototype and its use accessible to everyone with a basic awareness of CNC control. Upon completion, a test was performed on the basic materials and the resulting engraving quality is evaluated in the work.

### **Key words**

non-conventional machining technologies, LED laser, engraving, engraving laser, CNC

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VODIČKA, Jiří. *Návrh a zhotovení gravírovacího LED laseru* [online]. Brno, 2022. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139830>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

---

## 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.

---

Olomouc, 20. 5. 2022

---

Jiří Vodička

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

---

---

**OBSAH**

Úvod.....	8
1 Nekonvenční technologie obrábění .....	9
1.1 Ultrazvukové obrábění .....	9
1.2 Magneticko-abrazivní obrábění.....	10
1.3 Elektroerozivní obrábění .....	10
1.3.1 Hloubení (EDM sinking).....	10
1.3.2 Drátové řezání (WEDM Wire Electrical Discharge Machining) .....	11
1.4 Elektrochemické obrábění.....	11
1.5 Chemické obrábění.....	12
2 Nekonvenční paprskové obrábění .....	14
2.1 Obrábění vysokoenergetickým vodním proudem .....	14
2.2 Obrábění laserovým paprskem.....	14
2.2.1 Plynový laser .....	15
2.2.2 Polovodičový laser .....	15
2.3 Plazmové obrábění .....	16
3 Návrh prototypu laseru .....	17
3.1 Elektronika .....	17
3.2 Rám .....	19
3.3 Pohyb.....	20
4 Testování parametrů gravírovacího laseru.....	23
4.1 Optimální počet čar na milimetr.....	23
4.2 Test závislosti intenzity záření a rychlosti posuvu na kvalitu povrchu.....	23
4.3 Praktický test laseru.....	24
4.4 Porovnání schopností prototypu s komerčními lasery.....	26
5 Technicko-ekonomické zhodnocení .....	27
5.1 Výpočet nákladů na stavbu prototypu .....	27
6 Závěr.....	28
Seznam použitých zdrojů .....	29

---



## ÚVOD

Gravírování je způsob obrábění, kterým jsou odstraňovány povrchové vrstvy materiálu. Má využití jak v umělecké oblasti, tak i v průmyslu. K těmto účelům mohou sloužit například ruční nástroje, frézky, ale také lasery. Jednou z možností využití laseru v průmyslové sériové výrobě je značení součástí, tento proces je poměrně rychlý a oproti například ražení nezpůsobuje změny v makroskopické struktuře kovu, v případě značení laserem je tepelně ovlivněna pouze povrchová struktura základního kovu. Pomocí laseru je možné značit výrobky jakkoli složitými symboly, které jsou trvalé a odolné vůči okolním vlivům. Při tomto procesu dochází k modifikaci nebo změně barvy povrchu materiálu [1, 2].

Tato práce se zabývá návrhem a zhotovením prototypu gravírovacího LED laseru. V porovnání s široce využívanými CO<sub>2</sub> lasery jsou náklady na stavbu diodového laseru výrazně nižší. Diodové lasery jsou obecně slabší, při zvyšování výkonu však výrazně roste i cena. Při návrhu laseru jsem primárně vycházel z vlastních znalostí 3D tiskáren. Také jsem se inspiroval studií lineárních pohybových sestav.

První část práce se zabývá nekonvenčními metodami obrábění, k těm také patří laserové technologie. Další část se zabývá procesem návrhu gravírovacího LED laseru a nakonec je stroj otestován, přičemž je zhodnocena kvalita gravírování.



Obr. 1 Ukázka značení laserem [3].

## 1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

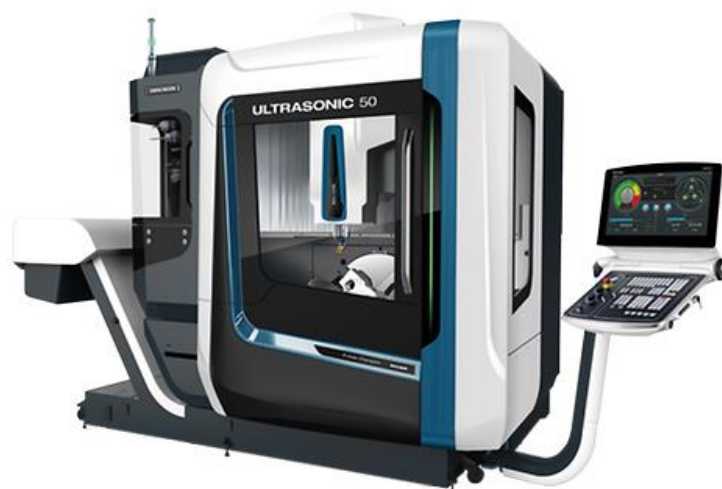
Nekonvenční technologie obrábění jsou většinou využívány k obrábění tvrdých a křehkých materiálů, které by konvenčními metodami nebylo možné obrobit. Přestože jsou principem progresivní a modernější, nemohou plně nahradit konvenční obráběcí stroje. Protože jsou tyto technologie založeny na mechanickém, tepelném, chemickém nebo elektrickém účinku, existují materiály, které jimi obrábět nelze. Pořizovací cena těchto strojů je vysoká, výhodou však jsou poměrně nízké náklady na provoz a údržbu. Méně často jsou potřebné dokončovací operace, protože výsledná součást má vyšší stupeň přesnosti a jakosti povrchu. Při nekonvenčním obrábění nemusí mít nástroje vyšší tvrdost než obráběný materiál, jako tomu je u konvenčních technologií, ale jsou na ně kladeny jiné požadavky a je možné obrábět tvarově složité díly [4].

### 1.1 Ultrazvukové obrábění

K úběru materiálu dochází mechanickým účinkem abraziva, které je společně s kapalinou dopravováno do pracovní mezery mezi nástrojem a obráběným povrchem. Vlastní nástroj kmitá kolmo k povrchu frekvencí 18–25 kHz. Abrazivo je přitlačováno k povrchu obrobku stálou silou, tím dochází k překopírování pracovní části nástroje. Kapalina slouží jako médium pro přívod nových a odvod opotřebených zrn. Používá se například voda, lín, nebo strojní olej. Abrazivní zrna bývají diamant, karbid boru, karbid křemíku a oxid hlinitý [5].

Při ultrazvukovém obrábění se mohou vyrábět velice přesné a tvarově složité výrobky, pro usnadnění práce jsou dostupné stroje s automatickou výměnou nástroje, stroje DMG Mori ULTRASONIC disponují zásobníky o kapacitě na 30–60 nástrojů. Stroje se mohou využít k frézování, vrtání a broušení materiálů od plastů až po slitiny titanu [6].

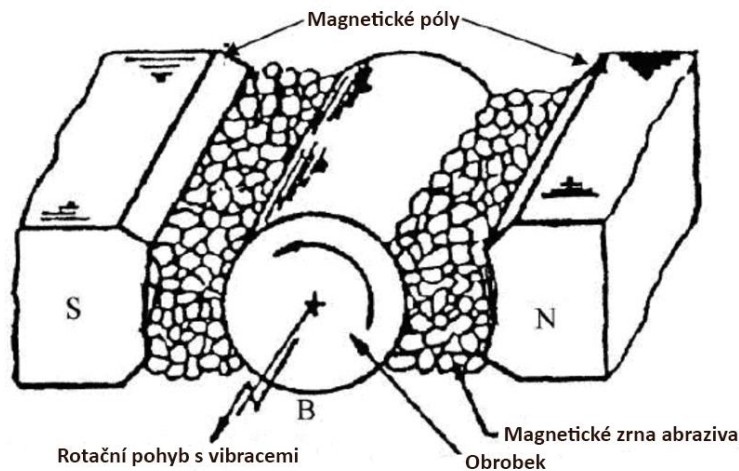
Nástroje pro ultrazvukové obrábění jsou negativem výsledného obráběného profilu. Při konstrukci nástroje závisí na druhu operace, při obrábění průchozích děr může být nástroj dutý, nebo plný a přesnost díry nezávisí na opotřebenosti nástroje, u neprůchozích děr však na opotřebenosti závisí, čelní plocha musí být pečlivě obrobena. Materiál nástroje se volí dle obráběného materiálu, základním požadavkem na materiál nástroje je vyšší tvrdost oproti obrobku, při použití měkčího materiálu dochází ke zvýšení opotřebenosti nástroje. Například na obrábění běžných ocelí se používá ocel třídy 11 a 12, mosaz nebo monel [4].



Obr. 2 DMG MORI Ultrasonic 50 [6].

## 1.2 Magneticko-abrazivní obrábění

Magneticko-abrazivní obrábění se používá jako dokončovací operace. Tato technologie využívá magnetismu a vzájemného pohybu částic abrazivní směsi s obrobkem ke srovnání nerovností povrchu obrobku, aplikuje se zejména na funkční rotační plochy. Zlepšuje geometrickou přesnost tvaru součásti, drsnost je možné snížit o 4–5 tříd v řádu desítek sekund a přispívá k odolnosti povrchu vůči opotřebení. Výsledná kvalita povrchu závisí na mnoha parametrech, jako je materiál abrazivní směsi i obrobku, z parametrů obrábění je to primárně pracovní mezera, čas obrábění a rychlost otáčení [4, 7].



Obr. 3 Schéma magneticko-abrazivního obrábění [8].

Touto metodou lze obrábět pouze kovové materiály. Jako abrazivum se používá směs brusných zrn, například diamant, ocelová nebo litinová drť s pohyblivým pojivem. Zrna musí být magnetická, aby se po zmagnetizování obrobku začala přibližovat, abrazivní strana abraziva musí směřovat směrem k obrobku. Jako zdroj magnetického pole se používají permanentní magnety nebo elektromagnety. Permanentní magnety mají výhodu nižší ceny, ale oproti elektromagnetům není technologicky možné nastavit intenzitu magnetického pole, působícího na abrazivní směs [4, 9].

## 1.3 Elektroerozivní obrábění

Úběr materiálu při elektroerozivním neboli elektrojiskrovém obrábění vykonává elektrický výboj mezi elektrodou a obrobkem v dielektriku. Touto metodou se mohou obrábět velmi tvrdé materiály s vysokou přesností, proto se využívá ve výrobě forem pro sériovou výrobu. [10] Dielektrikum musí být z místa obrábění odváděno kvůli znečištění. Jako dielektrikum se většinou používá deionizovaná voda. Obrobek je většinou připojen jako anoda a nástroj katoda. Při obrábění je obrobek udržován ve vzdálenosti 0,025 mm od obrobku. Protože je na anodě nižší potenciál, dochází k výboji, který způsobí úběr materiálu. [11].

### 1.3.1 Hloubení (EDM sinking)

K elektroerozivnímu hloubení se využívá tvarové elektrody, při tomto procesu dochází ke kopírování funkční části nástroje. Mezi nástrojem a obrobkem dochází k nahodilým výbojům a tím dochází k úběru materiálu. Pracovní cyklus je pečlivě řízen a střídá se mezi zapnutím a vypnutím. Delším časem zapnutí dosahujeme vyššího úběru materiálu, ale obráběný povrch je hrubší. Čas vypnutí je v podstatě čas mezi jednotlivými jiskrami, delší čas vypnutí umožňuje výplach pracovní mezery a tím odvod produktů obrábění. Tyto procesy jsou pečlivě řízeny

v závislosti na požadovaných parametrech. Při vypnutí se nástroj z pracovního prostoru zvedne, a naopak při zapnutí se spustí a vzniká jiskra [12].

Touto metodou lze řezat velmi přesné tvary, využívá se hlavně k výrobě střížných nástrojů, zápustek a tvarových nástrojů. K výrobě tvarově složitých součástí není potřeba výroby složitých nástrojů, ale lze využít několika jednoduchých nástrojů pro různé profily, proto se využívá strojů s automatickou výměnou nástroje [4].

### 1.3.2 Drátové řezání (WEDM Wire Electrical Discharge Machining)

Drátové elektroerozivní obrábění využívá tenký drát, který slouží jako elektroda, může být vyroben z mědi, mosazi či jiného vodivého materiálu. Drát se během obrábění opotřebovává, proto se musí stále vyměňovat, to se provádí automaticky odvíjením z cívky. Díky tomu, že nástroj není v přímém kontaktu s obrobkem a při obrábění nevznikají otřepy, je možné obrábět velmi tenké a složité předměty [13].



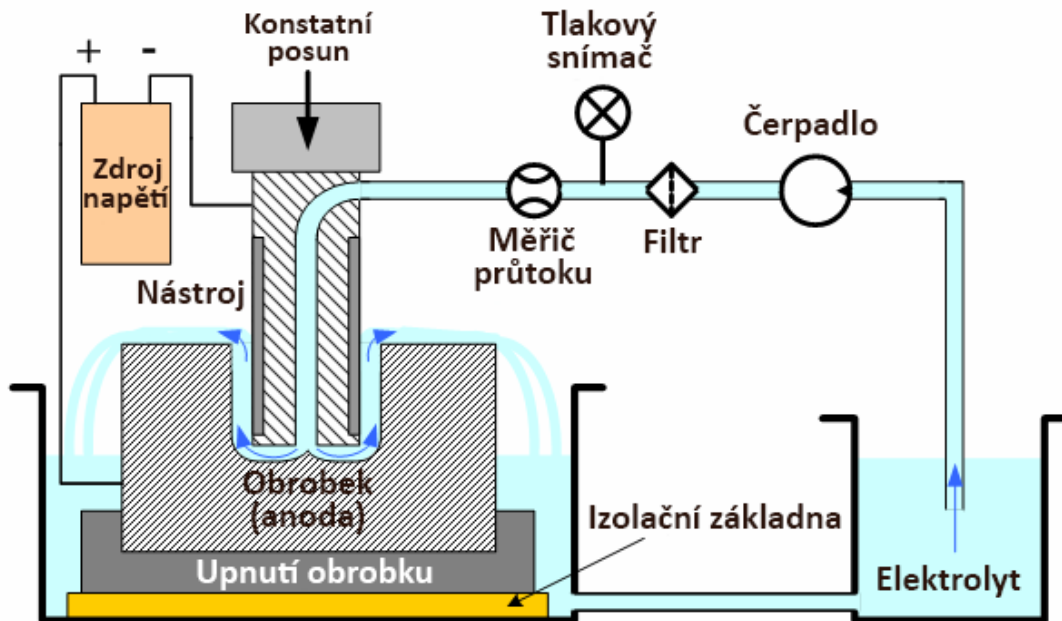
Obr. 4 Ukázka řezání drátovou elektrodou [14].

Samotný řez pak většinou probíhá ve dvou fázích, nejprve hrubovací operace s rychlejším posuvem a vyšším proudem dielektrika, za nímž následuje menší úběr, kterým je dosaženo tolerancí. Pro řezání profilů, jež nejsou na okraji obrobku, se musí nejprve vyvrtat díra, kterou je následně protažen drát. Některé stroje jsou pro tento účel vybaveny elektrodou pro vrtání počátečního otvoru [13].

## 1.4 Elektrochemické obrábění

Elektrochemické obrábění se využívá k obrábění vodivých materiálů. Tato technologie využívá fyzikálního jevu elektrolyza a díky němuž nevznikají třísky. Při obrábění tvoří obrobek anodu a je většinou ponořený do elektrolytu a nástroj katodu. Dochází k reakci, kdy se kationty elektrolytu slučují s anionty kovu na povrchu obrobku, tím dochází k úběru materiálu. Anoda kopíruje tvar katody a vzniká negativ nástroje. Jako elektrolyt se využívá NaCl, NaNO<sub>3</sub>, NaClO<sub>3</sub>, HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nebo NaOH [15].





Obr. 5 Princip elektrochemického obrábění [16].

Elektrochemické obrábění lze aplikovat na širokou škálu procesů od hloubení až po dokončovací operace pro dosažení vysoké kvality povrchu. Jako materiál nástroje se používá měď nebo mosaz díky dobré tepelné a elektrické vodivosti. Nástroj není při obrábění v přímém kontaktu s obrobkem a nedochází k úběru materiálu katody, jak tomu je u elektroerozivního obrábění. Materiály na výrobu nástrojů musí mít dobrou elektrickou vodivost, odolnost vůči výbojům a korozi, možnost jednoduché výroby a dostatečnou pevnost. V ideálním případě by byl tvar nástroje přesným negativem výsledného dílu, při obrábění však působí mnoho různých vlivů, které to nedovolují, jako například teplota nebo pH elektrolytu, proto se musí konečný tvar nástroje navrhnout empiricky [4].

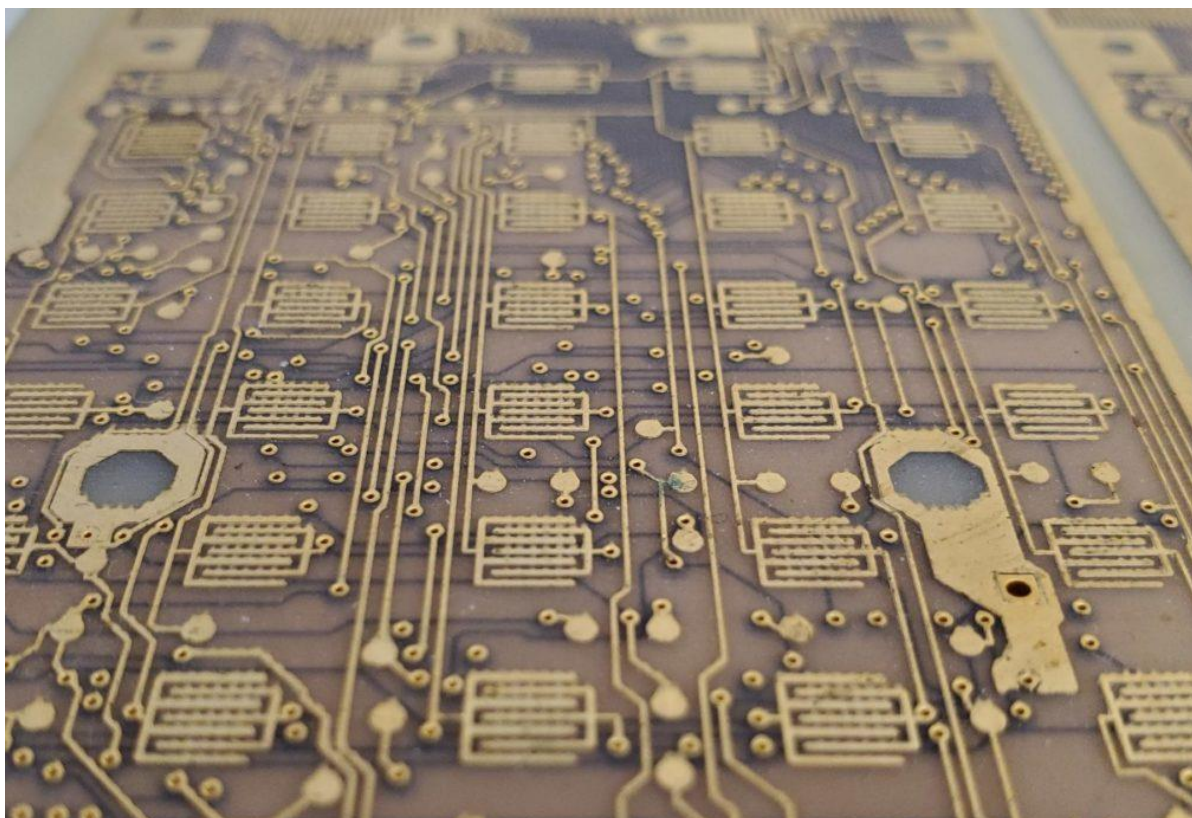
## 1.5 Chemické obrábění

Chemické obrábění označované CM (Chemical machining) je řízený úběr materiálu s využitím chemických reakcí mezi látkou obrobku a chemickou látkou. Variantou chemického obrábění je termické odstraňování otřepů, kdy mezi materiály dochází k termické reakci. Mezi další procesy chemického obrábění patří plynové obrábění, obrábění aktivní hmotou a chemické moření a leštění [4].

Leptání je metoda, kdy se povrchy, které nemají být obrobny, natrou speciálním lakem odolným vůči leptadlu nebo pryskyřici, nanášených ve vrstvách. Před nátěrem se povrch obrobku očistí a odmastí, aby nátěr řádně přilnul. Poté se ponoří do roztoku NaOH o koncentraci 400 až 500 g/l vody a teplotě 75–80 °C. Tato metoda se používá hlavně při zpracování hliníku a jeho slitin. Materiál je ubírán rovnoměrně, proto dochází k podleptání masky a tím je tvořeno zaoblení, z tohoto důvodu není možné leptáním vytvářet hrany. Leptání se používá například k výrobě integrovaných obvodů a velmi malých křemíkových součástek [4].

Chemické obrábění se používá na přesné obrábění kovových součástek. K ochraně neobrábených ploch se využívají materiály jako guma, plast nebo jiné materiály odolné proti činidlu. Leptadlo se volí v závislosti na obráběném materiálu. Tato metoda se využívá zejména ke snížení hmotnosti součástí v leteckém průmyslu. Další uplatnění této metody je ve výrobě polovodičů, elektroniky nebo v automobilovém průmyslu. Výsledné součásti jsou přesné a

drsnost povrchu se pohybuje od 0,75 až 3,75 Ra. Hlavní výhodou této metody je tedy výroba velmi přesných součástí, často jinou metodou nevyrobitelných [4, 17].



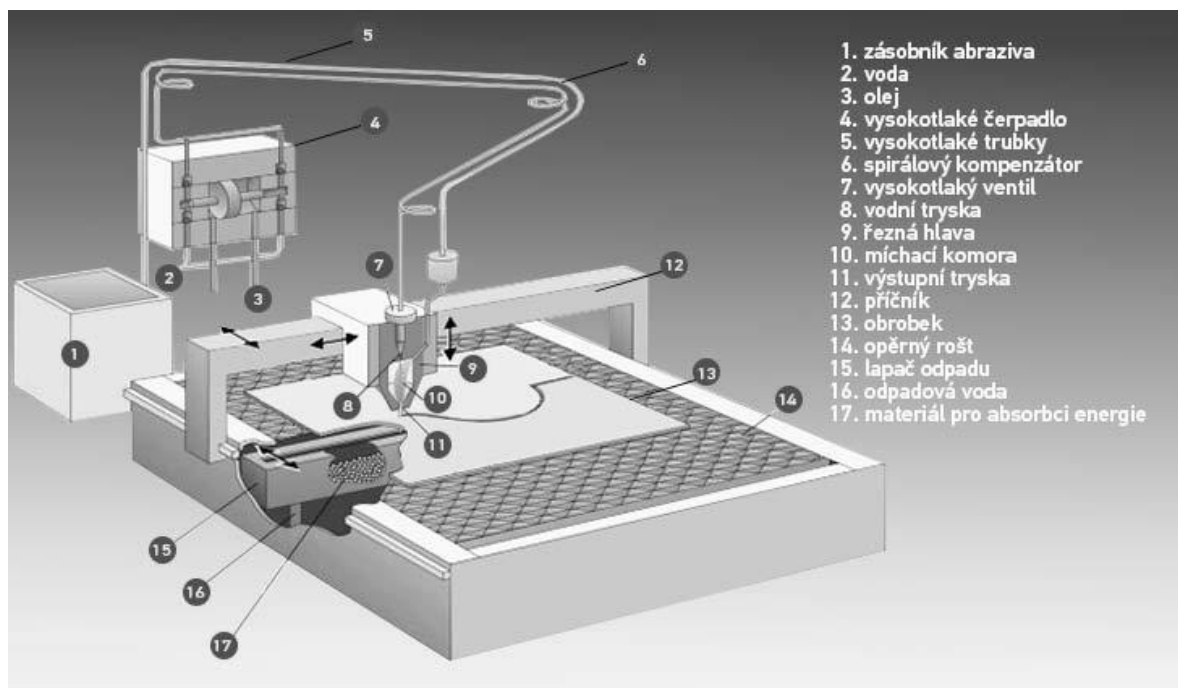
Obr. 6 Příklad využití chemického obrábění [18].

## 2 NEKONVENČNÍ PAPRSKOVÉ OBRÁBĚNÍ

Materiály lze dělit různými způsoby, například pomocí pásové nebo kotoučové pily. Jsou však moderní materiály, které tímto způsobem dělit nelze. Proto jsou využívány paprskové metody obrábění, které jsou často používány k dělení materiálu. Výhodou těchto technologií je možnost obrábění téměř všech kovových i nekovových materiálů, a to s poměrně vysokou přesností. Paprskové technologie nachází využití v sériové i kusové výrobě [4]. S využitím průmyslového robotu nebo rotační osy lze obrábět i prostorové tvary [19].

### 2.1 Obrábění vysokoenergetickým vodním proudem

Metoda obrábění pomocí vodního paprsku využívá kinetické energie vody k rozrušování materiálu. Voda je přiváděna do řezné hlavy vysokotlakým čerpadlem. Výsledný vodní paprsek, definovaný jako souvislý proud kapek, je vytvářen dýzou, dosahuje tlaku až 690 MPa. Materiál se může dělit čistým paprskem vody neboli WJM (Water Jet Machining), tato metoda se využívá v chemickém, potravinářském, metalurgickém průmyslu a v medicíně k obrábění měkkých materiálů. Při řezání tvrdých materiálů je využíváno abrazivního vodního paprsku (AWJ – Abrasive Water Jet Machining), kdy je abrazivum přiváděno ze zásobníku přímo do řezné hlavy tlakem vody, kde se mísí s jemným brusivem. Příměs brusiva zvyšuje účinnost řezání i kvalitu povrchu obrobených ploch. Jako abrazivum se využívá přírodní granát nebo olivín [4].



Obr. 1 Schéma stroje pro řezání vodním paprskem [20].

I přes poměrně vysoké vstupní náklady má metoda obrábění vodním proudem mnoho výhod. Při řezu nedochází k tepelnému ovlivnění okolí řezu, je možné produkovat tvarově složité výrobky s dobrou přesností. Oproti jiným paprskovým metodám neprodukuje toxické plyny ani prach, proto pracoviště zůstává čisté a je možné řezat měkké i tvrdé materiály [21].

### 2.2 Obrábění laserovým paprskem

Laser neboli light amplification by stimulated emission of radiation – zesilování světla stimulovanou emisí záření je všestranná technologie, kterou lze využít k řezání, gravírování i svařování téměř všech materiálů včetně plastů, dřeva, pryže a plexiskla [19]. První laser byl

sestrojen v roce 1960, tím byl pevnolátkový rubínový laser. V dnešní době jsou lasery rozšířené do všech odvětví, od medicíny až po průmyslovou výrobu. V průmyslu se využívají zejména díky flexibilitě, minimální hlučnosti a poměrně vysoké rychlosti obrábění. Zdroje záření se skládají ze tří základních částí, kterými jsou budič, aktivní prostředí a rezonátor. Z hlediska druhu aktivního prostředí se lasery dělí na plynné, pevnolátkové, vláknové, tekuté a polovodičové. Budič má za úkol dopravu světla do aktivního média. Aktivní médium vyzařuje paprsek o určité vlnové délce. Rezonátor je tvořen zrcadly, která zesilují optickou intenzitu paprsku. Konkrétně u polovodičových (diodových) laserů rezonátor tvoří leštěné, nebo povlakované póly PN přechodu [22, 23].

### 2.2.1 Plynný laser

Aktivní prostředí u plynových laserů je tvořeno plyny, jako je argon, helium, neon nebo směsí plynu helium-neon a oxid uhličitý. Z těchto prostředí je nejznámějším CO<sub>2</sub> laser, který se v praxi využívá ke značení, řezání i svařování. [23] Průchodem elektrického proudu plynem se atomy dostávají do excitovaného stavu, jelikož každá soustava směřuje k rovnovážnému stavu, dochází k úbytku přebytečné energie ve formě fotonů, které tvoří paprsek laseru, tento jev se nazývá populační inverze. [24] Během řezu je materiál zahřát do bodu varu a tlakem plynu vyfukován z místa řezu. Pro dělení uhlíkových ocelí se jako pracovní plyn využívá kyslík, pro vysokolegované oceli se používá dusík, protože dosahuje vyššího tlaku a zabráňuje oxidaci řezných ploch a tvorbě strusky na spodní straně řezu [19].

### 2.2.2 Polovodičový laser

Nejznámějším typem polovodičového laseru je diodový laser, jenž je podobný diodě s tím rozdílem, že PN přechod je opatřen leštěnou vrstvou arzenitu glanátého nebo fosfidu inditého, tyto plochy slouží k vytvoření a zesílení fotonů, které tvoří laserový paprsek. Přestože většina polovodičových laserů má strukturu diody, existují opticky buzené polovodičové lasery nebo kvantové kaskádové lasery. Diodové lasery mají oproti ostatním typům mnohonásobně menší rozměry a používají se například ve výpočetní technice pro zápis dat, gravírování nebo mohou být použity jako budiče jiných laserů [23, 25].

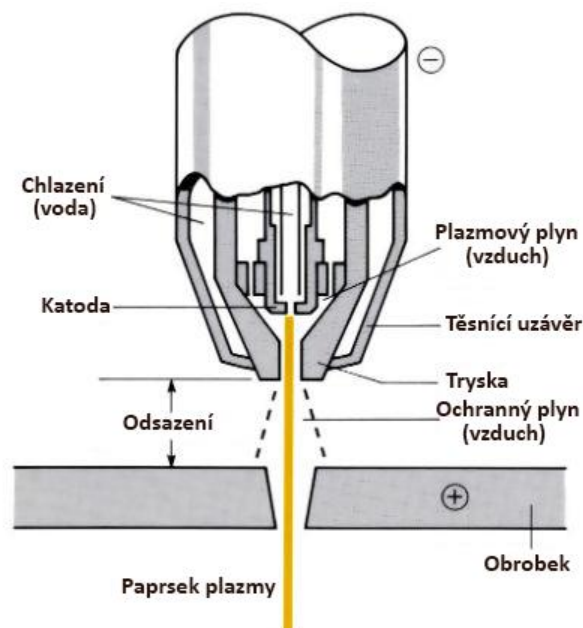


Obr. 2 Laserové diody [26].



### 2.3 Plazmové obrábění

Plazma je čtvrté skupenství hmoty, jedná se o skupenství s vysokým množstvím energie, vytváří se rozkladem molekul plynu za vysokého výkonu tepla při průchodu obloukem. Při řezání plazmou je kov tavený párami média v ionizovaném stavu, natavený materiál je z místa řezu odstraňován kinetickou energií plynů. Plazma na řezání vzniká použitím směsi plynů, stlačeného vzduchu, vodního proudu nebo kombinací plynu a vody. [4] Řezání plazmou je určeno k obrábění ocelí, neželezných kovů a kompozitů, probíhá za přítomnosti plynů, jejichž použití se volí v závislosti na obráběném materiálu. Plazmové plyny jsou elektrickým obloukem ionizovány, může to být argon, vodík, dusík, kyslík nebo vzduch. K zaostření a zvýšení tepelné intenzity se používá argon, dusík nebo směs argonu a vodíku, popřípadě argon a dusík. Asistenční plyny chrání místo řezu vůči korozi, k tomuto účelu se používá argon a dusík. Obecně se k řezání nejčastěji používá směs Ar a H<sub>2</sub> [4, 27]. Řez plazmou může probíhat s použitím vodní sprchy, některé stroje mohou dělit materiál ponořený pod vodou i s hořákem. Voda zabraňuje úniku toxických zplodin a záření a omezuje hlučnost procesu [19].



Obr. 9 Schéma vzduchové plazmové louče [28].

### 3 NÁVRH PROTOTYPU LASERU

Cílem návrhu prototypu bylo zkonstruovat kompletně uzavřený a spolehlivý stroj s odsáváním a filtrací zplodin gravírování. Při tvoření návrhu byl kladen důraz na jednoduchost sestavení mechanických i elektronických součástí. K výrobě některých komponentů bylo využito metody 3D tisku, která umožnila rychlé fyzické změny návrhu. Kompletní model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor.

#### 3.1 Elektronika

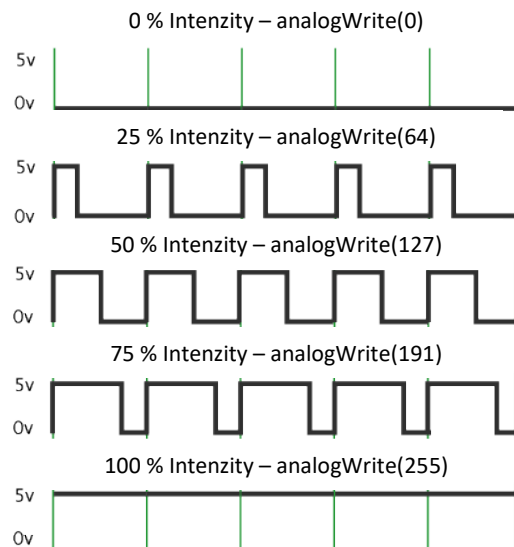
Hlavní součástí číslicově řízeného stroje je řídicí deska a firmware, kterými je stroj ovládán. Nejprve je tedy nutné rozhodnout, jaký firmware bude použit. K dispozici je mnoho variant jako GRBL, LinuxCNC, Marlin nebo Ruida. Pro tento prototyp byl zvolen GRBL, který je zdarma a má širokou komunitu uživatelů. K samotnému ovládání bylo použito programu LaserGRBL, ve kterém je možné vytvářet G-code pro gravírování.



Obr. 10 Prostředí LaserGRBL [29].

GRBL je původně vytvořen pro platformu Arduino, ale je možné použití i jiných řídicích desek. Při návrhu elektroniky bylo rozhodováno mezi Arduino v kombinaci s CNC shieldem a deskou Makerbase DLC32 s možností připojení tří nezávislých krokových motorů. Protože jsou již k dispozici nové verze firmwaru, tak Arduino chybí dostatečná paměť pro ostatní proměnné, které je možné nastavit, proto k ovládání byla vybrána deska od Makerbase, která sice nemá tak široké spektrum uživatelů jako Arduino, ale je k ní možné připojit dotykový display a využívá čipu ESP32, díky čemuž je možné k vytvoření firmwaru využít FluidNC. Konfigurace ve FluidNC se provádí v klasickém textovém editoru, je velmi zjednodušená a pro uživatele přístupnější, jelikož jsou nastavovány pouze parametry, které jsou nezbytné. Po vytvoření souboru se konfigurace nahraje přímo na procesor a stroj je po softwarové stránce připraven k použití [30, 31].

Jako nástroj byl zvolen 30W laserový modul s optickým výkonem 5,5 W. Tento laser je možné ovládat metodou PWM (pulse width modulation) i TTL (transistor-transistor logic). PWM generuje obdélníkové signály o hodnotě 0 nebo 5 V, doba trvání tohoto impulsu ovlivňuje intenzitu výsledného paprsku, například pokud bude laser dostávat signál po celou dobu, bude využívat 100 % svého výkonu, když bude signál kmitat s periodou 1 ms laser bude dostávat impuls pouze polovinu periody a druhou polovinu bude impuls nulový, pak bude intenzita záření 50 % viz obr. 11 [32].



Obr. 11 Průběh pulsně šířkové modulace [32].

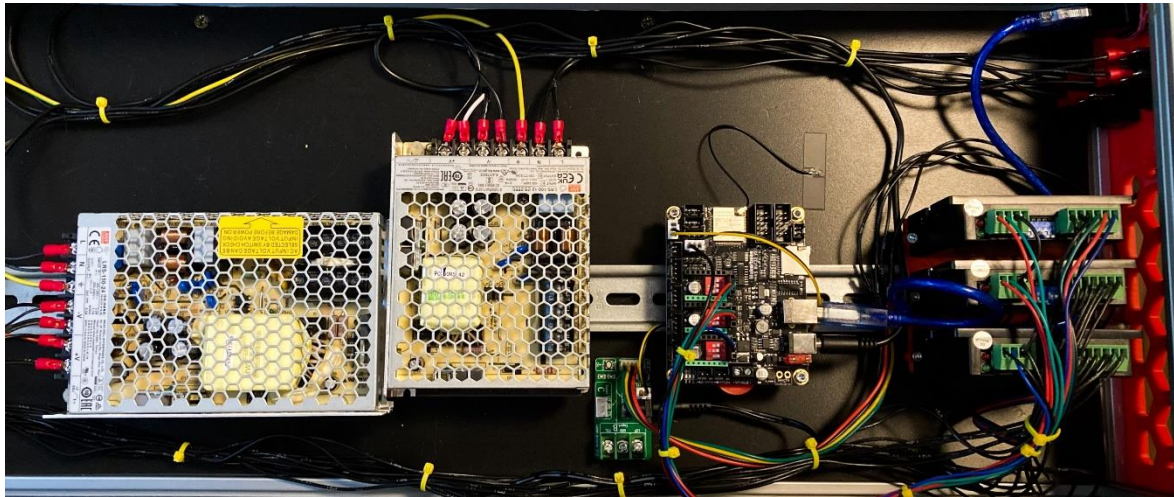
Pro pohyb systému je využito krokových motorů NEMA 17 s digitálními ovladači DM320T, jelikož se nejedná o konvenční obrábění a nedochází ke kontaktu obrobku s nástrojem, není zde potřebné vysokého krouticího momentu. Pohyb osy Y obstarávají dva krokové motory o krouticím momentu 56 Ncm a osy X jeden krokový motor o krouticím momentu 13 Ncm. Pro převod rotačního pohybu na lineární pohyb byly použity synchronní řemeny GT2 o šířce 6 mm a stoupání 2 mm v kombinaci s dvacetizubou kladkou. Krokové motory rotaci vykonávají pomocí kroků, u většiny motorů se výstupní hřídel otočí každým krokem o  $1,8^\circ$ , pro zvýšení rozlišení se využívá mikrokrokování, díky kterému je možné každý krok rozdělit na několik dalších. Maximální velikost mikrokrokování je určena parametry ovladače motorů. Před uvedením stroje do provozu je nutné vypočítat počet kroků na milimetr dle vztahu [33]:

$$k_m = \frac{k_{ot} \cdot f_m}{z \cdot p}, \quad (3.1)$$

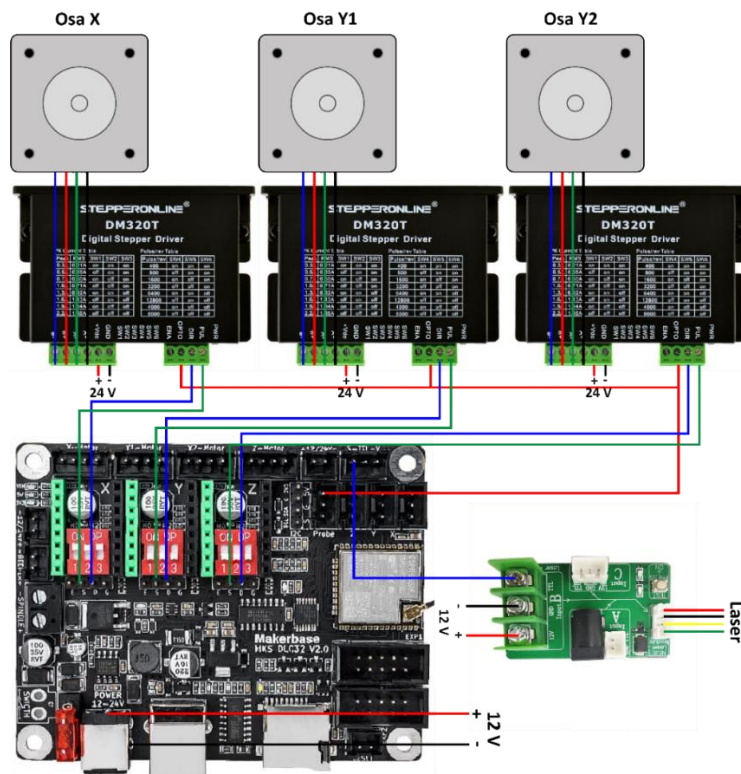
- kde:  $k_m$  - počet kroků na milimetr [kroků/mm]  
 $k_{ot}$  - počet kroků na otáčku motoru [kroků/ot]  
 $f_m$  - koeficient mikrokrokování [μkroků/krok]  
 $z$  - počet zubů kladky [-]  
 $p$  - stoupání zubů kladky [mm]

K napájení celého systému je využito dvou zdrojů stejnosměrného napětí, a to 12 V a 24 V, jelikož se potřebné napětí různých součástí liší. 12V zdroj napájí samotný laserový modul, řídicí desku a ventilátory, které slouží pro odvod spalin z pracovního prostoru laseru, 24V zdroj pohání tři krokové motory a ventilátory pro chlazení elektronické části zařízení.

Při stavbě prototypu došlo k problémům s elektronikou, resp. se zapojením krokových motorů a jejich konfigurace, nebylo zřejmé, jestli se jedná o softwarovou nebo hardwarovou chybu, proto byly otestovány různé konfigurace softwaru a různé kombinace zapojení. Ukázalo se, že je problém v zapojení aktivujícího vývodu a optočlenu ovladačů krokových motorů. Výsledné funkční zapojení je zobrazeno v obr. 13.



Obr. 12 Elektronická skříň laseru.



Obr. 13 Schéma zapojení elektroniky.

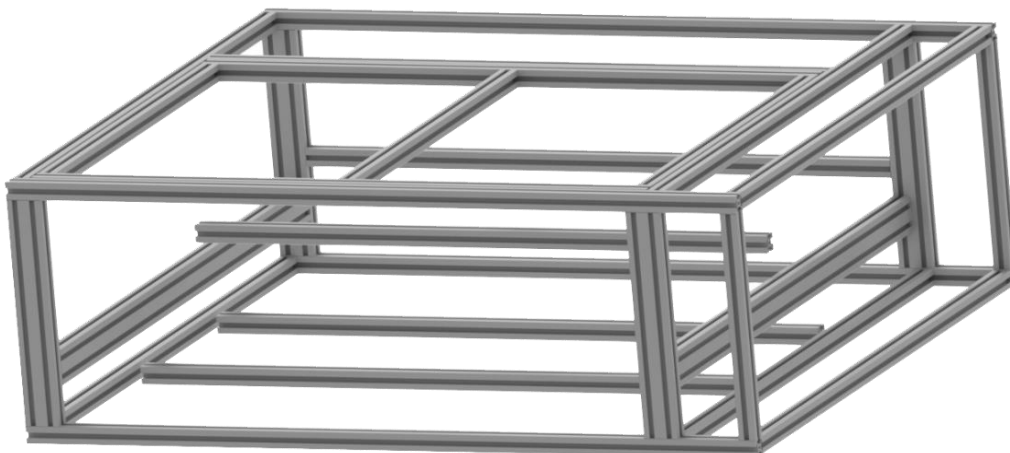
### 3.2 Rám

Na konstrukci rámu byly použity hliníkové profily o průřezu 2020 a 2040 s t-drážkami, ty byly zvoleny díky snadné montáži dílů pomocí t-matic. Jednotlivé profily jsou spojeny pomocí takzvaných „slepých spojů“, kdy na jednom konci je v díře vyřezán závit, do kterého je všroubován šroub s čokovou hlavou, jeho hlava je zasunuta do t-drážky a dírou v odpovídající vzdálenosti je utáhnut pomocí imbusového klíče.





Obr. 14 Exteriér laseru.



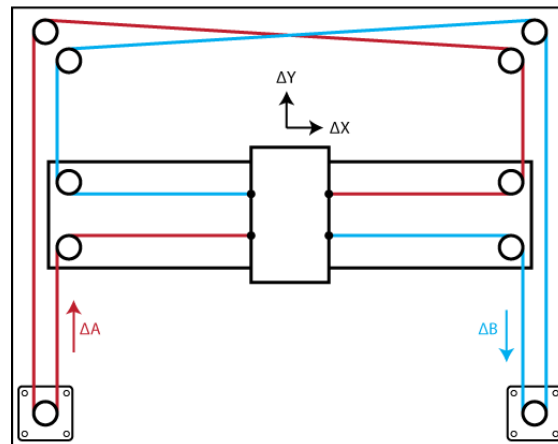
Obr. 15 Rám laseru.

Konstrukce je rozdělena na dvě části: skříň pro elektroniku a samotnou pracovní část. Elektronické komponenty jsou usazeny na liště pomocí spon. Pracovní i elektronická část je zakrytována PVC deskami, jako prevence zranění proudem a k odstínění záření samotného laseru. Nad pracovním prostorem jsou umístěna dvířka vyplněná taktéž PVC deskami.

### 3.3 Pohyb

V prvním návrhu prototypu bylo využito CoreXY kinematiky, obvyklé pro moderní 3D tiskárny. Principem tohoto systému jsou dva motory, které pracují ve dvou rozdílných rovinách následujícím způsobem: točí-li se dva motory v souhlasném směru, dochází k horizontálnímu pohybu, točí-li se opačně, dochází k vertikálnímu pohybu a v případě, že se točí pouze jeden motor, dochází k pohybu po diagonále. K přenosu krouticího momentu jsou využity synchronní řemeny. Výhodou této kinematiky je rychlost pohybu, avšak není využitelná v konvenčním obrábění kvůli způsobu přenosu krouticího momentu. Hlavním důvodem volby CoreXY, jako

pohybového systému, byl současný pohyb dvou motorů při gravírování v jednom směru. Avšak po sestavení první verze prototypu bylo od této kinematiky ustoupeno z důvodu zbytečné komplikovanosti systému. Vysoká rychlost není při laserovém gravírování využita [34].

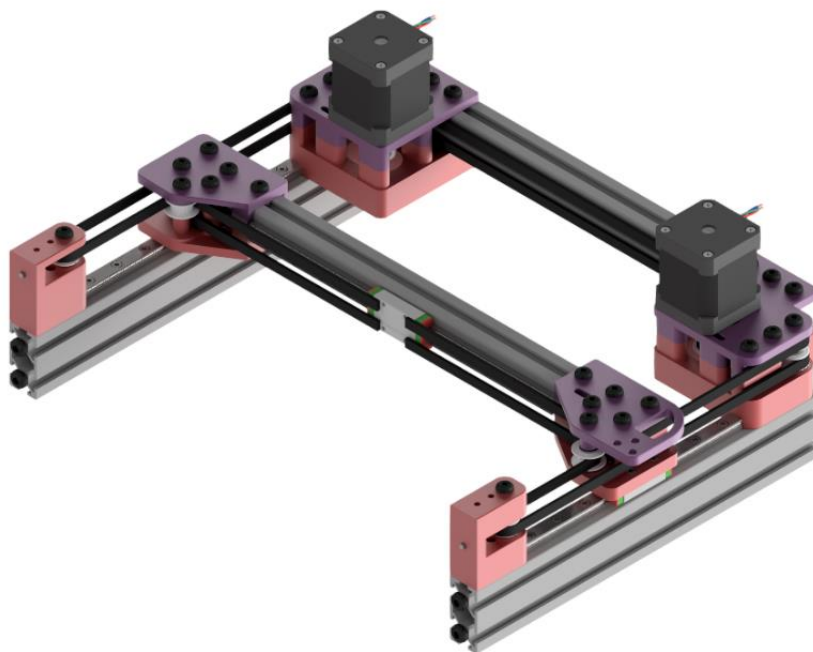


Pohybové rovnice

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B), \quad \Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B)$$

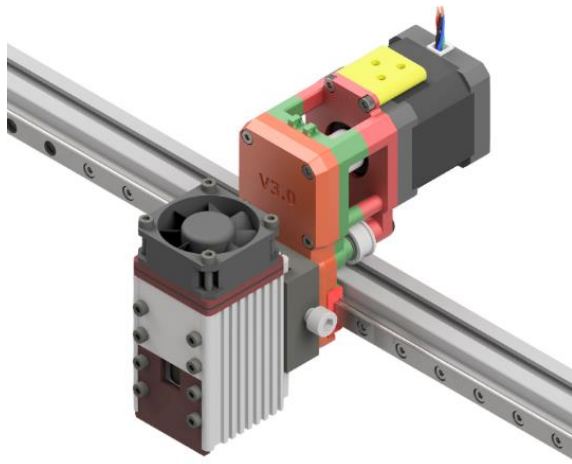
$$\Delta A = \Delta X + \Delta Y, \quad \Delta B = \Delta X - \Delta Y$$

Obr. 16 Schéma CoreXY kinematiky [34].

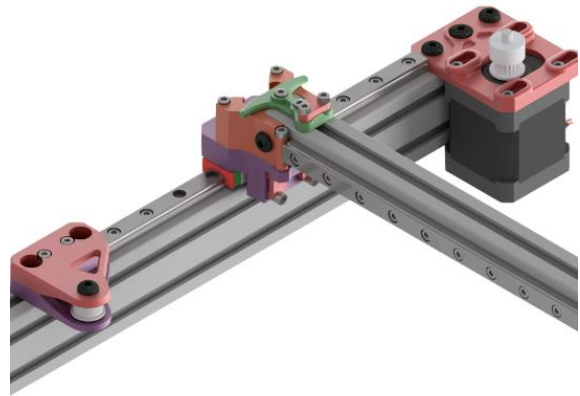


Obr. 16 Model CoreXY systému.

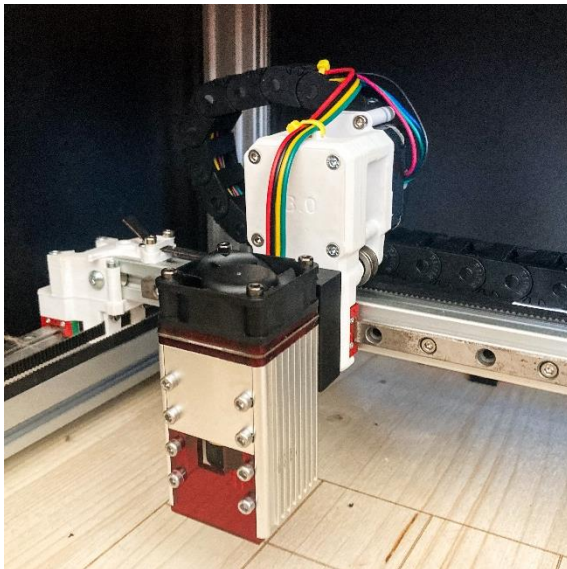
Při návrhu druhé verze bylo využito pravoúhlého/kartézského portálové systému, který se ukázal jako jednodušší na sestavení i na konstrukci. Zrychlení i stabilita systému je uspokojivá, oproti CoreXY je v sestavě méně ložisek, proto je i na údržbu méně náročná. Pro pohyb v osách bylo zvoleno lineární vedení MGN9, které se vyznačuje vysokou přesností a účinností, skládá se z vozíku a kolejnice, které se stýkají pomocí ocelových kuliček [35]. Velikost pracovního prostoru je 550 x 550 mm.



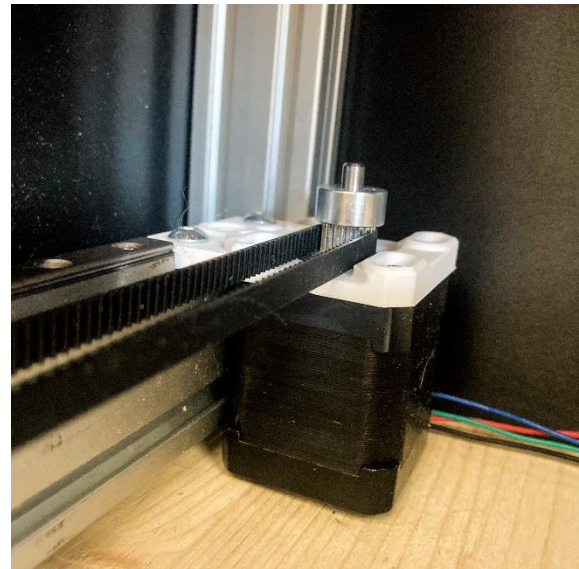
Obr. 17 Osa X.



Obr. 18 Osa Y.



Obr. 19 Foto osy X.



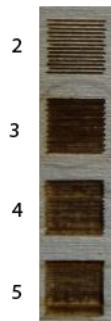
Obr. 20 Foto pohonu osy Y.

## 4 TESTOVÁNÍ PARAMETRŮ GRAVÍROVACÍHO LASERU

Test parametrů laseru probíhal na třech materiálech, kterými jsou smrkové dřevo, recyklovaný podkladový papír a kancelářský papír. Nejdříve byl proveden test optimální hustoty čar na milimetr, poté byl vytvořen testovací soubor k zjištění nejlepší rychlosti posuvu v závislosti na intenzitě laseru. Každý test se skládal z 25 vzorků s různou rychlostí posuvu a intenzitou paprsku, které byly vizuálně ohodnoceny, a následoval praktický test gravírování vektorového souboru.

### 4.1 Optimální počet čar na milimetr

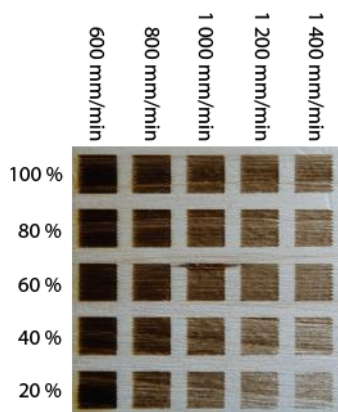
Jako testovací materiál bylo použito dřevo. Byl vytvořen testovací soubor, v němž se počet čar na milimetr pohyboval v rozsahu od 2 do 5. Z knihovny materiálů programu LaserGRBL bylo vybráno doporučené nastavení parametrů gravírování do dřeva pro podobně výkonný laserový modul. Z obr. 21 vyplynulo, že optimální počet čar na milimetr jsou tři, avšak počet čar úzce souvisí s velikostí obrazu, při volbě nižšího počtu čar je ztracena původní kvalita obrázku.



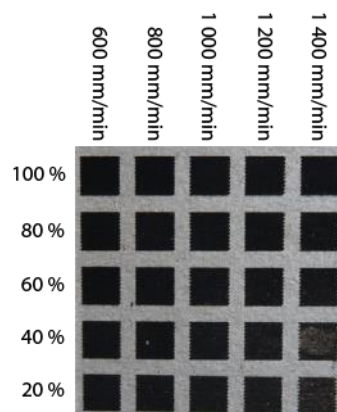
Obr. 21 Množství čar na milimetr.

### 4.2 Test závislosti intenzity záření a rychlosti posuvu na kvalitu povrchu

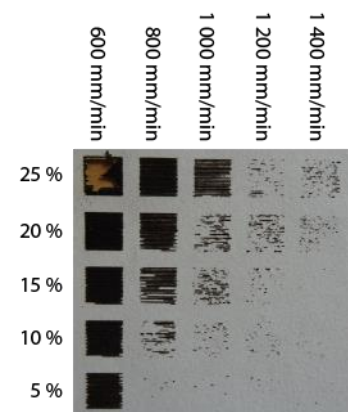
Tento test byl proveden na všech zmíněných materiálech a probíhal ve stejných intervalech, pouze pro bílý kancelářský papír byl interval intenzity snížen a pohyboval se od 5 do 25 % intenzity laseru. Z výsledku testů na kancelářském papíru je zřejmé, že jednotlivé čáry se nespojují v homogenní plochu, proto může být počet čar na milimetr vyšší, což je pravděpodobně způsobeno užším paprskem při nižší intenzitě laseru. Po provedení testu byla vybrána vhodná kombinace parametrů a bylo přikročeno k praktickému testu.



Obr. 22 Smrkové dřevo.



Obr. 23 Recyklovaný papír.



Obr. 24 Kancelářský papír.

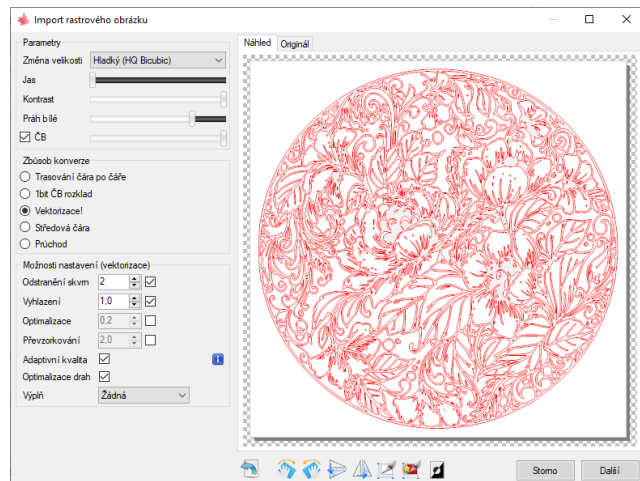


### 4.3 Praktický test laseru

Pro praktický test laseru byl zvolen obraz mandaly, protože diodový laser je schopen gravírovat a řezat pouze některé materiály, jedná se spíše o umělecky zaměřený nástroj. Pomocí LaserGRBL byl převeden do vektorové grafiky, aby vytvořil pouze obrys samotné mandaly, poté byl obraz gravírován po jednotlivých čarách s rozlišením 5 čar na milimetr.



Obr. 25 Mandala [36].



Obr. 26 Příprava souboru ke gravírování.

Samotné parametry gravírování byly vybrány z testů, které byly provedeny v kapitole 4.2. Gravírování bylo prováděno na vzorky o velikosti 100 x 100 mm a délka celého pracovního cyklu se pohybovala okolo 23 minut, v závislosti na rychlosti posuvu. Při gravírování byla použita sada dvou ventilátorů připojených na zdroj stejnosměrného napětí pro odfuk kouře z pracovního prostoru, aby bylo dosaženo co nejčistší stopy a nedošlo k znečištění čočky laseru. Z obr. 25 je zřejmé, že kancelářský papír je ke gravírování nejméně vhodný, při menší intenzitě laseru nejsou zřejmé všechny kontury obrazce, a naopak při zvýšení intenzity laseru dochází k propalu.

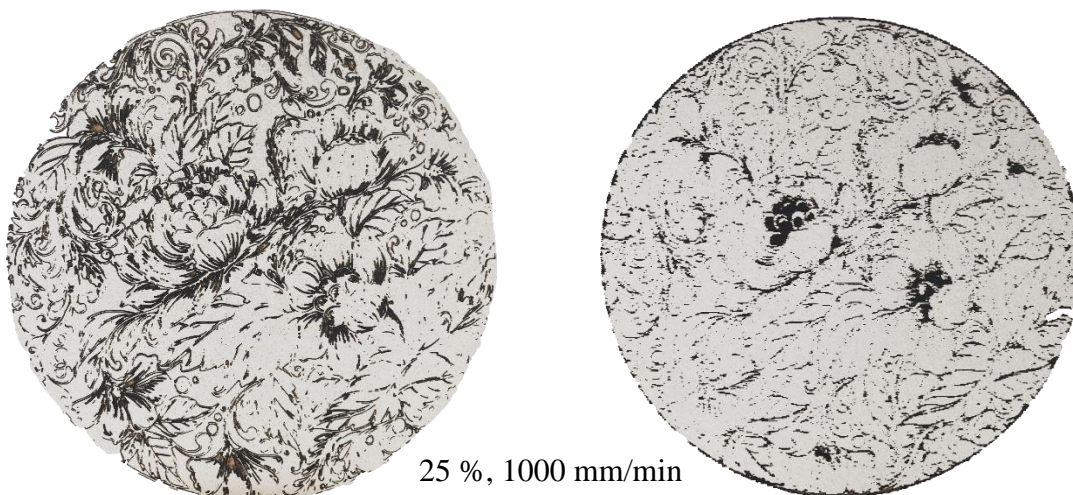


Obr. 27 Gravírování do dřeva.





Obr. 28 Gravírování podkladového papíru.



25 %, 1000 mm/min



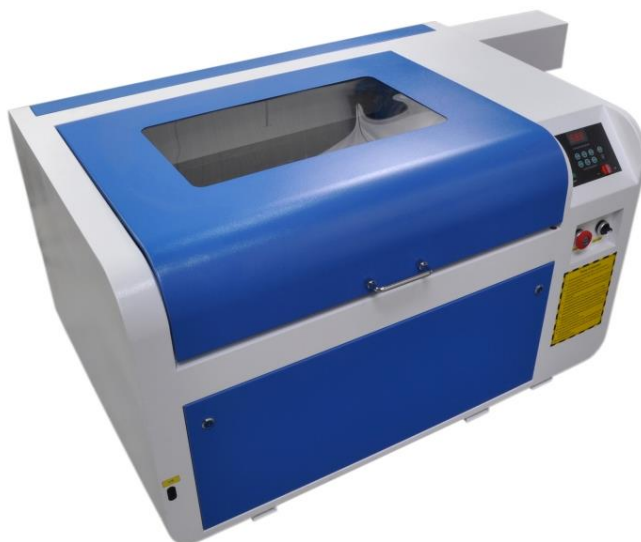
30 %, 1000 mm/min

Obr. 29 Gravírování kancelářského papíru.

#### 4.4 Porovnání schopností prototypu s komerčními lasery

Většina gravírovacích laserů, dostupných na evropském a českém trhu jsou CO<sub>2</sub> lasery, jejich cena má široké rozpětí a pohybuje se od 15 000 do 550 000 Kč v závislosti na výkonu laserové trubice a velikosti pracovní plochy. CO<sub>2</sub> laser se 40W laserovou trubicí a pracovním prostorem 60 na 40 cm má srovnatelný výkon a velikost pracovní plochy, je k dostání za 34 380 Kč, to je více než dvojnásobek výrobní ceny prototypu, avšak tyto stroje mají několik výhod, jako je například polohovatelný pracovní stůl nebo odfuk kouře z místa řezu. Schopnosti gravírování by měly být srovnatelné [37, 38].

Gravírovací LED lasery na tuzemském trhu nemají takové zastoupení jako CO<sub>2</sub> lasery, je však možné porovnat prototyp s lasery ze zahraničních obchodů. Lasery, které jsou osazeny podobně nebo stejně výkonným laserovým modulem s přibližně stejnou pracovní plochou, mohou být pořízeny za cenu okolo 12 000 Kč, v porovnání s prototypem je tvoří jednoduchý čtvercový rám, pro pohyb využívají koleček ve v-drážkách a pro pohon osy Y využívají samostatného krokového motoru (využitím tohoto systému při stavbě prototypu by bylo možné doplnit výškově nastavitelnou osu Z, popřípadě rotační osu) a nemají krytou pracovní část [39].



Obr. 21 CO<sub>2</sub> gravírovací laser [39].

## 5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Protože cílem bylo vytvoření spolehlivě fungujícího gravírovacího laseru s jednoduchým sestavením, byl při výběru komponentů kladen důraz na kvalitu. V dnešní době je k dostání poměrně široká škála kompletních gravírovacích diodových laserů z Číny za poměrně nízkou cenu, například NEJE Laser Master 3 Max se stejným laserovým modulem jako má tento prototyp, se cenově pohybuje okolo 12 000 Kč [40]. Většina komponentů byla zakoupena od zahraničních obchodníků přes nákupní portál Aliexpress, ostatní součásti byly pořízeny v českých e-shopech, protože by cena s poštovním přesahovala cenu v tuzemských obchodech.

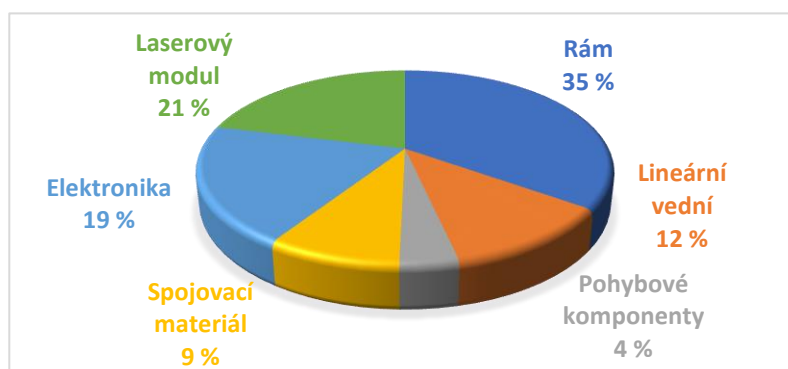
### 5.1 Výpočet nákladů na stavbu prototypu

Sestava prototypu obsahuje více než 500 součástí, ty byly rozděleny do 8 kategorií a zaneseny do tabulky. Pro názornost podílu nákladů jednotlivých kategorií byl vytvořen graf. K některým kategoriím byl vytvořen komentář způsobu snížení nákladů. Z tabulky 1 je zřejmé, že rám je nejnákladnější položkou v seznamu, bylo na něj použito 14 m profilu 2020 a 3 m profilu 2040 s t-drážkou, cena tohoto množství je celkem 2 698 Kč, při zachování stejného rozměru rámu a použití čtvercových a obdélníkových hliníkových trubek by byla úspora 1 100 Kč [41, 42].

Tab. 1 Celkové náklady na stavbu prototypu.

Kategorie	Cena [Kč]
Rám + desky	4 994
Lineární vedení	1 674
Pohybové komponenty	553
Spojovací materiál	1 268
Elektronika	2 821
Laserový modul	3 028
<b>Celkem</b>	<b>14 338</b>

Lineární vedení tvoří významný podíl celkových nákladů, při použití například lineárních ložisek nebo koleček do v-drážky by se mohla úspora na lineárním vedení pohybovat okolo 500 Kč. Nedílnou součástí ovládní krokových motorů jsou jejich ovladače, v prototypu jsou použity ovladače DM320T, jejich hlavní výhodou je jednoduché ovládní mikrokrokování a nastavení proudu, které se provádí kombinací spínačů, jejichž hodnoty jsou zobrazeny na těle ovladače, nevýhodou je však cena. Tři ovladače DM320T stojí 1 016 Kč, naproti tomu tři ovladače DRV8825 vychází na 204 Kč, což je rozdíl 812 Kč [43, 44].



Obr. 30 Graf podílu jednotlivých kategorií na celkové ceně laseru.



---

## 6 ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zaměřena na návrh a sestavení prototypu gravírovacího LED laseru. Praktická část práce je koncipována jako postup při návrhu podobného zařízení. Během návrhu došlo ke změně kinematického systému z důvodu rozporu s některými cíli, avšak díky technologii 3D tisku byl proces od návrhu až po sestavení nového fyzického prototypu rychlý.

Po dokončení byl vytvořen testovací soubor v programu LaserGRBL k určení optimálních parametrů gravírování pro dřevo, recyklovaný podkladový papír a kancelářský papír. Díky těmto testům bylo zjištěno, že maximální rychlost gravírování dřeva je 1400 mm/min, v případě kancelářského papíru však z testů vyplynulo, že tento materiál není ke gravírování vhodný.

Existuje mnoho možností, jak stroj vylepšit, například přidáním kompresoru pro odfuk kouře z místa řezu, doplněním koncových spínačů, které by usnadnily práci s laserem, a osazením osou Z a rotační osou. Tyto komponenty mohou být kdykoli přidány, díky nim by bylo možné gravírovat i prostorové a rotační tvary. Parametry gravírování by bylo možné vylepšit mapováním hodnot intenzity laseru, která by umožnila přesnější nastavení výkonu. Je vhodné doplnit výkonnější odsávání kouře, jelikož momentální řešení nemá dostatečný výkon a kouř je zadržován v pracovním prostoru stroje.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. LINTECH. *Značení* [online]. b.r. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/laserove-znacení/>
2. ŘASA, J. *Popis světlem je trvalý* In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. 8. února 2017 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/popis-svetlem-je-trvanlivy>
3. Jack, *Complete Guide of Fiber Laser Marking Machine 2021* [online]. 7. května 2021 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.elephant-cnc.com/blog/complete-guide-of-fiber-laser-marking-machine/>
4. MIČIETOVA, Anna. *Progresívne technológie*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2016. 408 s. ISBN 978-80-554-1288-7.
5. KEREČANINOVÁ, Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění – 3. díl. MM Průmyslové spektrum* [online]. 18. prosince 2007 [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-3-dil>
6. DMG MORI, *Ultrasonic 50* [online]. 2022 [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/ultrasonic/ultrasonic-universal-monoblock/ultrasonic-50/>
7. SAXENA, Vipul, Prem Shanker YADAV a Harveer Singh PALI. *Materials Today: Proceeding – Effects of magnetic abrasive machining process parameters on internal surface finish* [online]. 10. prosince 2019 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2214785319337344?token=12B5284562E3AE2F282A50395F888EBA4E6541B8CDC93A518512089AC342A6B4C30EA852E828C26DDA89A0EF322E8705&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220508132725>
8. DJAVANROODI, F. *Artificial Neural Network Modeling of Surface Roughness in Magnetic Abrasive Finishing Process. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* [online]. 2013, s. 1976-1983 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/285963010\\_Artificial\\_Neural\\_Network\\_Modeling\\_of\\_Surface\\_Roughness\\_in\\_Magnetic\\_Abrasive\\_Finishing\\_Process#read](https://www.researchgate.net/publication/285963010_Artificial_Neural_Network_Modeling_of_Surface_Roughness_in_Magnetic_Abrasive_Finishing_Process#read)
9. MONROE ENGINEERING. *What Is Magnetic Abrasive Finishing?* [online]. 16. července 2019 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://monroeengineering.com/blog/what-is-magnetic-abrasive-finishing/>
10. INVO. *Elektroerozivní obrábění EDM (drátování, hloubení)* [online]. ©2022 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.invocz.cz/elektroerozivni-obrabeni-edm-dratovani-hloubeni>
11. PALANIKUMAR, K, J. Paulo DAVIM. *Electrical discharge machining: study on characteristics of WC/Co composites* [online]. 2013, s. 135-168 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857091543500052>
12. AEROSPECENG. *Understanding What EDM Die Sinking is All About* [online]. 11. května 2020 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://aerospeceng.com.au/understanding-what-edm-die-sinking-is-all-about/>
13. THOMAS. *Wire Cut EDM (Electrical Discharge Machining)* [online]. ©2022 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/Wire-Cut-EDM/>

- 
14. AAA Tool & Machine. *What are the Advantages of Using Wire EDM Machining* [online]. 16. dubna 2019 [cit. 2022-02-09] Dostupné z: <https://aaatoolandmachine.com/advantages-wire-edm-machining/>
  15. KEREČANINOVÁ, Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění. MM Průmyslové spektrum*. [online]. 9. října 2007 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2>
  16. PANDILOV, Zoran. *Application of Electro Chemical Machining for materials used in extreme conditions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. (2018) [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/323982539\\_Application\\_of\\_Electro\\_Chemical\\_Machining\\_for\\_materials\\_used\\_in\\_extreme\\_conditions](https://www.researchgate.net/publication/323982539_Application_of_Electro_Chemical_Machining_for_materials_used_in_extreme_conditions)
  17. SEMACH. *Chemické obrábění - Chemické frézování* [online]. ©2008-2021 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <http://www.semach.cz/vyroba/leptane-dily/vyrobní-podklady>
  18. CHEMCUT. *Etching* [online]. ©2002-2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.chemcut.net/products/etching/>
  19. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
  20. MORKUS Morava s.r.o.. *Princip řezání vodním paprskem* [online]. ©2016 [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>
  21. MISHRA, Pankaj. *Water Jet Machining – Working Principle, Advantages and Disadvantages with Application* [online]. ©2022 [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.mechanicalbooster.com/2017/05/water-jet-machining.html#Advantages>
  22. HUBERT, Michael. *Obrábění laserem pro všechna odvětví. MM Průmyslové spektrum* [online]. 11. února 2015 [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-laserem-pro-vsechna-odvetvi>
  23. FRASER, Alex. *The Five Main Types of Lasers* [online]. 24. září 2021 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: <https://www.laserax.com/blog/types-lasers>
  24. Britannica. *Population inversion* [online]. 18. března 2022 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/population-inversion>
  25. PASCHOTTA, R. *Field Guide to Lasers* [online]. Bellingham, WA: SPIE Press, 2008 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: [https://spie.org/publications/fg12\\_p33\\_semiconductor\\_lasers](https://spie.org/publications/fg12_p33_semiconductor_lasers)
  26. *Laser diode* [online]. b.r. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.pngwing.com/en/free-png-pexpk>
  27. KEREČANINOVÁ, Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění – 8. díl. MM Průmyslové spektrum* [online]. 8. října 2008 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>
  28. OpenLearn. *Plasma arc cutting* [online]. 7. února 2018 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/plasma-arc-cutting>
  29. *LaserGBRL: Free Laser Engraving* [online]. b.r. [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://lasergrbl.com/>
  30. *FluidNC In: Github* [online]. 3. května 2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://github.com/bdring/FluidNC/wiki>
-

- 
31. GRBL In: *Github* [online]. 16. září 2021 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://github.com/grbl/grbl/wiki>
  32. HIRZEL, Tim. *Basics of PWM (Pulse Width Modulation)* [online]. 3. března 2022 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/learn/microcontrollers/analog-output>
  33. AASVIK, Mads. *Tutorial: Calibrating Stepper Motor Machines with Belts and Pulleys* [online]. 29. července 2015 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.norwegiancreations.com/2015/07/tutorial-calibrating-stepper-motor-machines-with-belts-and-pulleys/>
  34. MOYER, Ian. *Principle of Operation* In: *core(X,Y)* [online]. ©2012 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://corexy.com/theory.html>
  35. HIWIN s.r.o. *Lineární vedení* [online]. b.r. [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/cz/download>
  36. Harryarts. *Elegant decorative mandala floral background* In: *Freepik.com* [online]. ©2010-2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: [https://www.freepik.com/free-vector/elegant-decorative-mandala-floral-background\\_9953086.htm#page=13&query=mandala&position=42&from\\_view=search](https://www.freepik.com/free-vector/elegant-decorative-mandala-floral-background_9953086.htm#page=13&query=mandala&position=42&from_view=search)
  37. PAJTECH. *Plotry* [online]. b.r. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://pajtech.cz/plotry-c-785\\_775\\_817.html](https://pajtech.cz/plotry-c-785_775_817.html)
  38. BRIOL s.r.o.: *Laser* [online]. ©2013-2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://www.briol.cz/produkty?f\[f\\_f\]=laser&f\[from\\_search\]=1](https://www.briol.cz/produkty?f[f_f]=laser&f[from_search]=1)
  39. Aliexpress: *30W Laser Engraver* [online]. b.r. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://www.aliexpress.com/af/30W-laser-engraver.html?d=y&origin=n&SearchText=30W+laser+engraver&catId=0&spm=a2g0o.productlist.1000002.0&initiative\\_id=SB\\_20220516052749](https://www.aliexpress.com/af/30W-laser-engraver.html?d=y&origin=n&SearchText=30W+laser+engraver&catId=0&spm=a2g0o.productlist.1000002.0&initiative_id=SB_20220516052749)
  40. Aliexpress: *NEJE Laser Master 3 Max* [online]. b.r. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: [https://www.aliexpress.com/wholesale?catId=0&initiative\\_id=SB\\_20220508020634&SearchText=NEJE+Laser+Master+3+Max&spm=a2g0o.home.1000002.0](https://www.aliexpress.com/wholesale?catId=0&initiative_id=SB_20220508020634&SearchText=NEJE+Laser+Master+3+Max&spm=a2g0o.home.1000002.0)
  41. ALUSIC. *Profily IM 20-5* [online]. ©2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.alusic-profily.cz/profily-im-20-5/>
  42. Ehlinik. *Hlinikové jekly - čtvercové, obdelníkové* [online]. ©2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/hlinikove-jekly-ctvercoveobdelnikove/kat-F300000101.html>
  43. STEPPERONLINE. *Digital Stepper Driver DM320T* [online]. ©2005-2022 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.omc-stepperonline.com/digital-stepper-driver-0-3-2-2a-10-30vdc-for-nema-8-11-14-16-17-stepper-motor-dm320t>
  44. Sharplayers s.r.o.. *DRV8825* [online]. ©2021-2022 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://eshop.sharplayers.cz/p/drv8825-ovladac-krokovych-motoru>
-