

# Porovnání technologií řezání laserem a řezání plazmou

Václav Matějka

---

Bakalářská práce  
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Václav Matějka
Osobní číslo:	T17095
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Porovnání technologií řezání laserem a řezání plazmou

### Zásady pro vypracování

1. vypracujte literární rešerši na dané téma
2. proveďte experimentální obrábění zadané součásti pomocí laserové a plazmové technologie
3. porovnejte obě technologie

### Seznam doporučené literatury:

1. Šuba, O. Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 2010. 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
2. Švehla, Š., Figura Z. Ultrazvuk v technologii. Bratislava: Alfa 1984. 521 s.
3. Maňková, I.. Progresivní technologie. Viena. Košice 2000. ISBN 80-7099-430-4.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

---

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
děkan

---

**prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2020

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá srovnáváním laserového a plazmového řezání. V teoretické části této práce jsou rozděleny a popsány různé nekonvenční metody obrábění. Na závěr teoretické části jsou důkladněji rozebrány laserové a plazmové technologie.

Náplní praktické části byla příprava a výroba vzorků pomocí laserové a plazmové technologie při stanovených různých technologických podmínkách. Naměřené hodnoty byly následně využity pro vyhodnocení kvality řezu obou technologií, a to se zaměřením na úkos řezu a jakost řezných hran. V závěru praktické části byla naměřená data graficky vyhodnocena za použití univerzálního mikroskopu CARL ZEISS a bezdotykového drsnoměru Taylor Hobson. Získané výsledky jsou přehledně srovnány pomocí fotografií a 3D modelů naskenovaných obrobených ploch.

Klíčová slova: laser, plazma, nekonvenční metody obrábění

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis compares laser and plasma cutting of materials. In theoretical part of thesis is given introduction to various unconventional machining methods and brief description of them. Technologies using laser and plasma are described more in detail at the end of theoretical part.

The goal of practical part was preparation and manufacturing of samples by laser and plasma technology under various technological conditions. Evaluation of cutted area quality by usage of both technologies, with focus on the chamfer of the cut and quality of cutting edges was done by measurement of selected values. Measured data were then graphically evaluated using the universal CARL ZEISS microscope and Taylor Hobson non-contact roughness tester. Obtained results are clearly compared using photographs and 3D models of scanned machined surfaces.

Keywords: laser, plasma, unconventional machining methods

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za vedení, odborné rady, trpělivost, ochotu a čas, který strávila na této práci. Také bych chtěl poděkovat firmám HP – KOVO a KS – KOVO za možnost uskutečnit praktickou část této práce.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 NEKONVENČNÍ ZPŮSOBY OBRÁBĚNÍ</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ PODLE PŘEVLÁDAJÍCÍCH ÚČINKŮ ODDĚLOVÁNÍ</b> .....	<b>11</b>
<b>2 ODDĚLOVÁNÍ MATERIÁLU MECHANICKÝM ÚČINKEM</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 OBRÁBĚNÍ ULTRAZVUKEM (USM)</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2 OBRÁBĚNÍ PAPRSKEM VODY (WJM)</b> .....	<b>14</b>
<b>3 ODDĚLOVÁNÍ MATERIÁLU ELEKTROCHEMICKÝM NEBO CHEMICKÝM ÚČINKEM</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1 ELEKTROCHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ (ECM)</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2 CHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ (CM)</b> .....	<b>17</b>
3.2.1 CHEMICKÉ ROZMĚROVÉ LEPTÁNÍ .....	17
3.2.2 CHEMICKÉ PROSTŘIHOVÁNÍ .....	17
<b>4 ODDĚLOVÁNÍ MATERIÁLU ELEKTROTEPELNÝM NEBO TEPELNÝM ÚČINKEM</b> .....	<b>18</b>
<b>4.1 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ (EDM)</b> .....	<b>18</b>
<b>4.2 OBRÁBĚNÍ PAPRSKEM ELEKTRONŮ (EBM)</b> .....	<b>19</b>
<b>5 PLAZMA (PBM)</b> .....	<b>21</b>
<b>5.1 POUŽITÍ PLAZMY V PRAXI:</b> .....	<b>21</b>
<b>5.2 PLAZMOVÉ ŘEZÁNÍ</b> .....	<b>22</b>
<b>5.3 BEZPEČNOST PRÁCE</b> .....	<b>25</b>
<b>6 LASER (LBM)</b> .....	<b>26</b>
<b>6.1 ROZDĚLENÍ LASERŮ</b> .....	<b>28</b>
<b>6.2 POUŽITÍ LASERŮ V PRAXI</b> .....	<b>29</b>
<b>6.3 BEZPEČNOST PRÁCE</b> .....	<b>33</b>
<b>7 CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE</b> .....	<b>34</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>35</b>
<b>8 POUŽITÉ VZORKY A MĚŘENÉ VELIČINY</b> .....	<b>36</b>
<b>8.1 MATERIÁL VZORKŮ</b> .....	<b>37</b>
8.1.1 OCEL 11 373 .....	37
<b>8.2 MĚŘENÉ VELIČINY</b> .....	<b>37</b>
8.2.1 DRSNOST POVRCHU .....	37
8.2.2 ÚKOS.....	38
<b>9 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ PRO VÝROBU A MĚŘENÍ VZORKŮ</b> .....	<b>39</b>

9.1	LASER.....	39
9.2	PLAZMA.....	41
9.3	DRSNOMĚR.....	42
9.4	UNIVERZÁLNÍ MIKROSKOP .....	42
9.5	POSUVNÉ MĚŘÍTKO .....	42
10	VYHODNOCENÍ JAKOSTI ŘEZU .....	43
10.1	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ JAKOSTI ŘEZU U VZORKŮ VYROBENÝCH PLAZMOU .....	44
10.1.1	TLOUŠŤKA 5 MM, OBRÁBĚNÁ PLAZMOU .....	44
10.1.2	TLOUŠŤKA 10 MM, OBRÁBĚNÁ PLAZMOU .....	45
10.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ JAKOSTI ŘEZU U VZORKŮ VYROBENÝCH LASEREM.....	46
10.2.1	TLOUŠŤKA 5 MM, OBRÁBĚNÁ CO <sub>2</sub> LASEREM .....	46
10.2.2	TLOUŠŤKA 10 MM, OBRÁBĚNÁ CO <sub>2</sub> LASEREM .....	47
10.3	ZHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ JAKOSTI ŘEZU U VZORKŮ ŘEZANÝCH NA CO <sub>2</sub> LASERU A PLAZMĚ .....	48
10.3.1	TLOUŠŤKA 5 MM, OBRÁBĚNÁ PLAZMOU .....	48
10.3.2	TLOUŠŤKA 5 MM, OBRÁBĚNÁ CO <sub>2</sub> LASEREM .....	49
10.4	POROVNÁNÍ JAKOSTÍ ŘEZU OBROBENÉHO POVRCHU VZORKŮ ŘEZANÝCH NA CO <sub>2</sub> LASERU A PLAZMĚ .....	51
10.5	ZHODNOCENÍ .....	52
11	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ÚKOSU.....	53
11.1	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ÚKOSU KRUHOVÉHO OTVORU, PLAZMA .....	54
11.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ÚKOSU KRUHOVÉHO OTVORU, LASER.....	57
11.3	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ÚKOSU VNĚJŠÍHO OBRYSU, PLAZMA .....	60
11.4	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ÚKOSU VNĚJŠÍHO OBRYSU, LASER.....	63
11.5	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ÚKOSŮ .....	66
11.6	ZHODNOCENÍ .....	67
	ZÁVĚR .....	68
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	70
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	72
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	73
	SEZNAM TABULEK.....	75



## ÚVOD

V dnešní moderní době jsou od zákazníků kladeny vysoké požadavky na rychlost, kvalitu a životnost výrobků. Proto se můžeme v praxi čím dál častěji setkat s nekonvenčními metodami obrábění, které od 50. let postupně nabývají na významnosti nejen ve strojírenském průmyslu, ale i zdravotnickém nebo potravinářském. Jedná se o metody, které využívají k úběru materiálu chemických, tepelných nebo elektrochemických účinků. Na rozdíl od klasických konvenčních metod, které využívají k úběru materiálu mechanickou práci. Nekonvenční metody obrábění se nejčastěji využívají pro obrábění těžko obrobitelných materiálů nebo složitých tvarových dílů.

Při automatizaci výroby se velmi často CNC stroje spojují s některou nekonvenční technologií, a tím získáváme velmi produktivní a úsporné zařízení. CNC stroje mají velkou výhodu v rychlosti programování, v jednoduchém změnění tvaru či velikosti obrobku, a především v bezpečnosti práce.

Vývoj nekonvenčních způsobů obrábění jde stále dopředu a přibývá stále více nových technologií. Je velmi těžké se pohybovat mezi takovým množstvím technologií a zjistit, která z nich je vhodná pro konkrétní výrobu. A proto se tato bakalářská práce zabývá seznámením nejpoužívanějších technologií a následným porovnáním laserové a plazmové technologie. V praktické části byly vyrobeny a naměřeny vzorky pro názorné určení rozdílů jednotlivých technologií.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 NEKONVENČNÍ ZPŮSOBY OBRÁBĚNÍ

V některých případech moderního strojírenství nemůžeme použít konvenčních metod obrábění z důvodu složitosti tvaru, druhu materiálu, kvality obrábění apod.

U nekonvenčních metod obrábění dochází k úběru materiálu vlivem tepla, chemické reakce, elektřiny, ultrazvuku, abraze nebo jiných fyzikálních jevů, a to převážně bez vzniku třísky. Na rozdíl od konvenčních metod obrábění (např. soustružení, frézování, broušení), kde dochází k úběru vlivem mechanické práce. Výhoda je v tom, že v obrobku nevznikají silové rázy a vibrace, a tak není nutno upnutí obrobku. Dalšími výhodami je zvýšení sériové výroby, automatizace výroby, zvýšení tvrdosti a lepší odolnosti proti korozi.

Obrobitelnost materiálu obráběného pomocí nekonvenčních metod není většinou dána pevností ani tvrdostí, ale fyzikálními vlastnostmi jako jsou například tepelná vodivost, teplota tavení, chemická odolnost, elektroerozivní odolnost apod. [8]

K největšímu vývoji nekonvenčních metod přispěly zejména požadavky zbrojního a kosmického průmyslu.

*„V těchto oblastech průmyslu byly soustředěny potřebné finanční prostředky a vědeckovýzkumné kapacity pro úspěšné dokončení vývoje a zavedení nových zařízení do výrobní praxe.“* (Morávek, 1999, s. 5)

Další nekonvenční metody obrábění se velmi rychle rozmohly do dalších odvětví strojírenské výroby a jejich rozvoj nadále pokračuje. [12]

### 1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění podle převládajících účinků oddělování

#### 1) Oddělování materiálu mechanickým účinkem:

- Obrábění ultrazvukem (USM)
- Obrábění paprskem vody (WJM)

#### 2) Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem:

- Elektrochemické obrábění (ECM)
- Chemické obrábění (CM)

3) Oddělování materiálu elektrotepelným nebo tepelným účinkem:

- Elektroerozivní obrábění (EDM)
- Obrábění paprskem elektronů (EBM)
- Obrábění paprskem plazmy (PBM)
- Obrábění paprskem laseru (LBM)

## 2 ODDĚLOVÁNÍ MATERIÁLU MECHANICKÝM ÚČINKEM

### 2.1 Obrábění ultrazvukem (USM)

Obrábění ultrazvukem je technologie, při které se rozkmitá nástroj pomocí ultrazvukových kmitů zhruba na frekvenci 18–25 kHz. Při této frekvenci pak nástroj vtlačuje brusná zrna roznesená ve vodě do obrobku. Zrna pak svými ostrými hranami vyštipují malé části obrobku. [16]

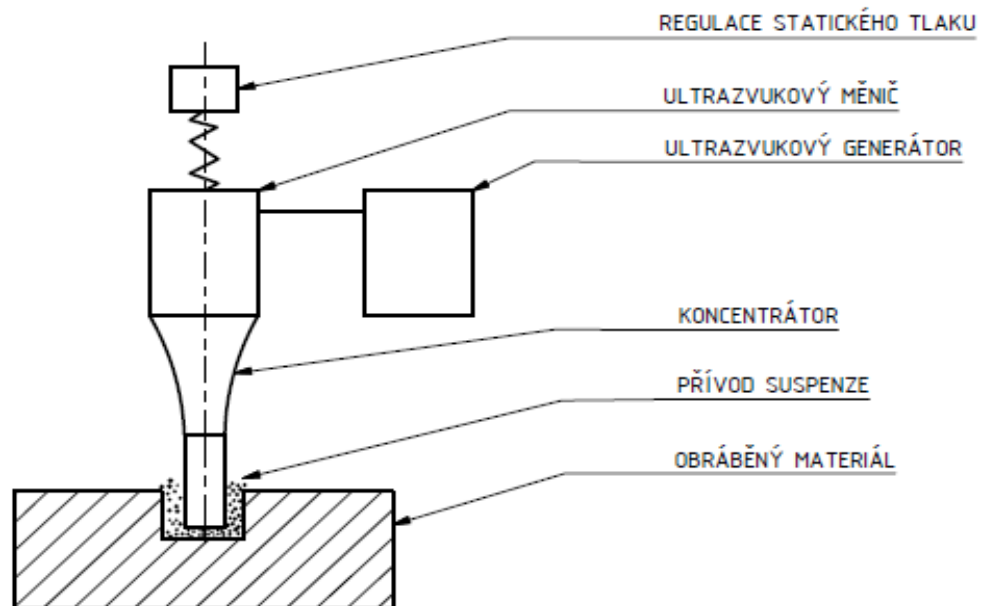
Jako brusivo pro toto obrábění se používá karbid bóru, karbid křemíku nebo elektrokorund. Podle tvrdosti materiálu určujeme koncentraci brusiva, nejčastěji je však 30 – 40 % (hmotnosti).

Tuto metodu používáme u tvrdých a křehkých materiálů, jako např. sklo, křemík, keramika, germánium, slinuté karbidy, diamant a další různé polodrahokamy. [16]

Ultrazvukový stroj má dva základní prvky, a to **ultrazvukový měnič** a **ultrazvukový generátor**. Ostatní části stroje jsou obvykle koncentrátory, které mají za úkol zesilovat amplitudu měniče, ale také přenášejí vibrace na ultrazvukový nástroj.

**Generátor** je přístroj k přeměně elektrické energie s frekvencí 50 Hz na vysokofrekvenční energii většinou s frekvencí 19 - 25 kHz.

**Měnič** je přístroj, který přeměňuje vysokofrekvenční energii z generátoru na mechanickou energii. [12]



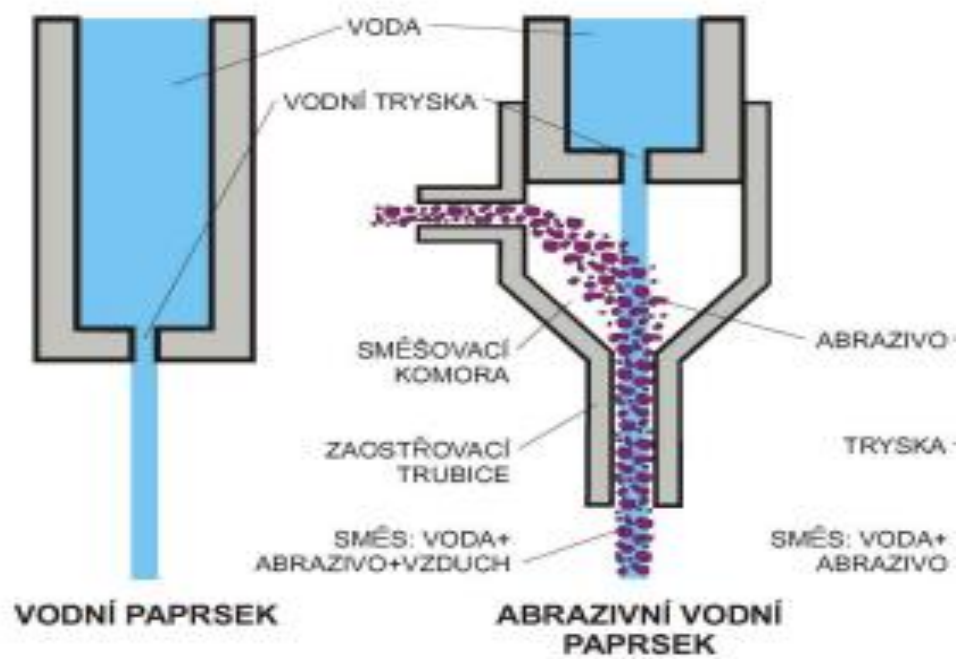
Obr. 1. Schéma ultrazvukového obrábění [12]

## 2.2 Obrábění paprskem vody (WJM)

Při řezání vodním paprskem považujeme jako řezný nástroj paprsek vody, který má velmi vysoký tlak i rychlost. V praxi se nejčastěji potkáme s řezáním čistým paprskem vody nebo paprskem vody s příměsí abraziva.

Hlavní součástí stroje je hydraulický násobič, což je zdroj vysokého tlaku vody. Dokáže zvýšit tlak vody z 20 MPa až na 400 MPa. Voda je dopravena za stálého vysokého tlaku potrubím až k řezací hlavě a její trysce, kde se voda mísí s abrazivem do jednoho paprsku. [12]

Výhodou při řezání vodním paprskem je řezání materiálu bez tepelného ovlivnění. A proto nedochází k deformaci vlivem tepla nebo změně struktury materiálu. Je tedy možné řezat různé kovové i nekovové materiály, jako jsou korozivzdorné oceli, tepelně zpracované materiály, slitiny titanu, neželezné kovy, plasty, vrstvené materiály, materiály plněné skelnými vlákny, gumy, grafit apod. [8]



Obr. 2. Schéma obrábění paprskem vody [14]

### 3 ODDĚLOVÁNÍ MATERIÁLU ELEKTROCHEMICKÝM NEBO CHEMICKÝM ÚČINKEM

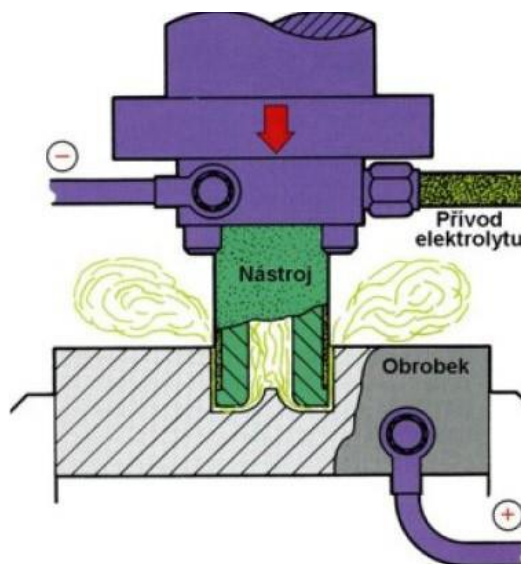
#### 3.1 Elektrochemické obrábění (ECM)

Elektrochemické obrábění funguje na způsobu působení elektrického proudu na kapalinový vodič (elektrolyt). Kapalinový vodič prochází mezi nástrojem a obrobkem štěrbinou 0,05-2 mm, přičemž nástroj je katoda a obrobek anoda. Na základě elektrochemických reakcí se rozpouští obráběný materiál, tedy anoda. [12]

Velmi důležité je volit správný materiál pro nástroj. Materiál musí mít dostatečnou tuhost, ale přitom být i dobře obrobitelný, a také odolný proti chemickému působení kapalinového vodiče. Materiál nástroje bývá nejčastěji **bronz**, **mosaz**, nerezavějící ocel a titan. Tvar nástroje je stejný jako tvar požadovaný, jen vytvořený zrcadlovým obrazem. [8]

Jako elektrolyt většinou volíme roztoky anorganických solí, jako jsou například chlorid sodný, chlorid draselný nebo nitrid sodný. Samozřejmě někdy používáme i jiná aditiva, a to třeba velmi aktivní kyseliny nebo zásady převážně při obrábění speciálních materiálů.

Elektrochemické obrábění má velkou výhodu v tom, že dokáže obrobit i těžko obrobitelné materiály, které by se standardními metodami nedaly obrábět. Což jsou např. kalené oceli, žárovečné slitiny apod. [1]



Obr. 3. Schéma elektrochemického obrábění [14]



## 3.2 Chemické obrábění (CM)

Chemické obrábění je založené na postupném odleptávání vrstev materiálu po setinách milimetru někdy až po několika milimetrech. Při obrábění probíhá chemická reakce mezi pracovním prostředím a obráběným materiálem. Prostředí je nejčastěji kyselinou nebo hydroxidem. Plochy, které nechceme leptat, musíme chránit speciálním vrstvou tzv. „maskou“. Chemické obrábění můžeme dělit na chemické rozměrové leptání a na chemické prostřihování. [8]

### 3.2.1 Chemické rozměrové leptání

Tuto metodu také můžeme nazývat jako chemické frézování.

*„Tvar obrobku se přenáší na polotovar vesměs podle šablon. Leptání se provádí ponořením do leptacích roztoků. Nejlépe se tímto způsobem obrábějí slitiny.“* (Kocman, 2011, s. 158)

### 3.2.2 Chemické prostřihování

*„Ve většině případů aplikací je obrys výrobku přenášen na polotovar fotochemickým tištěním. Princip přenosu spočívá v nanesení fotosenzitivní vrstvy na povrch polotovaru, na kterou se fotografickou cestou přenáší obrys výrobku. Fotosenzitivní vrstva jednak lokalizuje odleptávaná místa a jednak chrání místa, která nemají být leptána.“* (Kocman, 2011, s. 159)

Prostřihování je vhodné pro složité výlisky z tenkého plechu nebo fólií bez jakéhokoliv otřepu. [8]

## 4 ODDĚLOVÁNÍ MATERIÁLU ELEKTROTEPELNÝM NEBO TEPELNÝM ÚČINKEM

### 4.1 Elektroerozivní obrábění (EDM)

*„Elektroerozivní obrábění je proces, u kterého se dosahuje úběr materiálu elektrickými výboji mezi katodou (nejčastěji ji tvoří nástrojová elektroda) a anodou (nejčastěji ji tvoří obrobek) ponořenými do tekutého dielektrika, což je většinou kapalina s vysokým elektrickým odporem.“ ( Řasa, 2001, s. 90)*

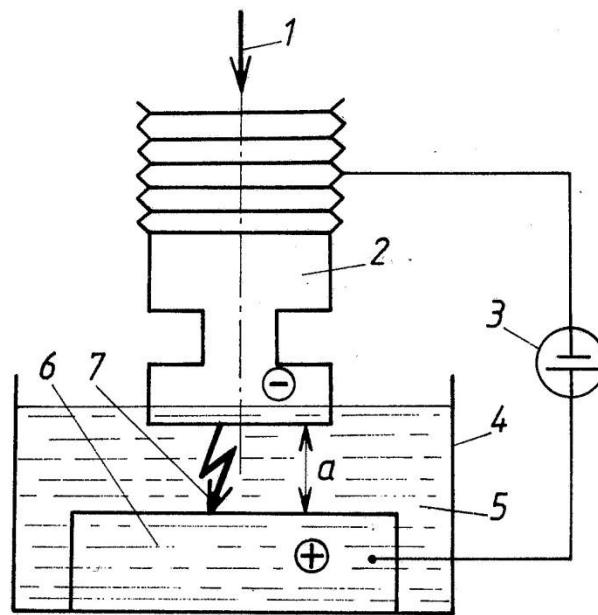
Podstatou elektroerozivního obrábění je tání materiálu a odpařování vlivem vysoké koncentrace energie. Tento úběr materiálu nazýváme elektroeroze.

Elektroeroze může probíhat jak v kapalném, tak i v plynném prostředí (dielektrikum). Podléhají jí jen vodivé materiály. Z toho plyne, že elektroerozivním obráběním lze obrábět jen vodivé materiály.

Pod elektroerozivní obrábění spadá:

- hloubení dutin zápustek a forem,
- výroba složitých tvarových povrchů,
- řezání drátovou elektrodou,
- leštění povrchů,
- výroba malých otvorů (mikroděrování),
- elektrokontaktní obrábění.

Nástrojová elektroda musí být z materiálu s dobrou obrobitelností, elektrickou vodivostí a dostatečnou pevností. Nejpoužívanější materiál pro výrobu elektrod je grafit. Má ovšem jednu velkou nevýhodu a to, že znečišťuje stroj. Dále se elektrody vyrábí i z mědi, mosazi, wolframu apod. Elektrody se vyrábí obráběním, lisováním, práškovou metalurgií, litím apod. [16]



Obr. 4. Schéma elektroerozivního obrábění [16]

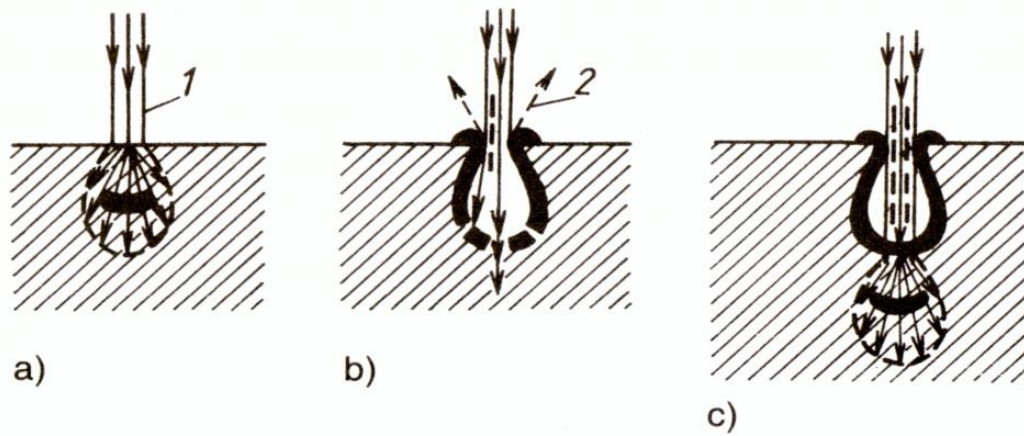
1 – směr posuvu nástroje elektrody, 2 – nástrojová elektroda, 3 – generátor, 4 – pracovní vana, 5 – tekuté dielektrikum, 6 – obrobek, 7 – elektrický výboj

## 4.2 Obrábění paprskem elektronů (EBM)

„Obrábění paprskem elektronů se využívá soustředěný svazek elektronů o vysoké rychlosti, který dopadá na obráběný materiál, ten se natavuje a tím se odpařuje.“ (Kocman, 2011, s. 152)

Touto metodou lze obrábět pouze kovy, které nemají vlastnosti jako jsou houževnatost, elektrická vodivost, tvrdost a bod tavení jako omezující činitel. Nejpoužívanější je tato metoda při výrobě velmi malých děr, protože dokáže vrtat v rozmezí 0,1 až 1 mm.

Metoda umožňuje obrábět kovy jako jsou tantal, titan, molybden, wolfram. Velkou nevýhodou však je, že se musí obrábět ve vakuu. [18]



*Obr. 5. Schéma obrábění paprskem elektronů [16]*

a) vnik elektronů do materiálu, b) erupční odpařování, c) opakovaný vnik elektronů do materiálu

1 – elektronový paprsek, 2 – páry odpařeného kovu

## 5 PLAZMA (PBM)

Plazmu si můžeme představit jako čtvrté skupenství látek. Vzniká při elektrickém výboji mezi anodou a katodou, anebo ionizací plynu při vysokých teplotách, které jsou někdy i vyšší jak 20 000 °C.

Plazma je elektricky vodivá a podléhá účinkům magnetického a elektrického pole.

V praxi se nejvíce používá pro zdroj tepla při ionizaci elektrický oblouk, který tvoří výboj mezi dvěma uhlíkovými elektrodami. Plazma využívá dvou základních typů plazmových oblouků: **transformovaný** (přenesený) a **netransformovaný** (nepřenesený - využívá se pro nevodivé materiály). [11]

### 5.1 Použití plazmy v praxi:

- **Nanášení povlaků** pomocí paprsku plazmy. Nanášet můžeme železné i neželezné kovy jako např. slitiny kovů, karbidy, tantal, nikl, ale i keramické materiály nebo plasty. Pomocí povlaků zlepšujeme odolnost proti korozi, elektrickou nevodivost, ale i odolnost proti teplotním rázům. Materiál pro povlakování se do hořáku přivádí jako prášek, drát nebo tyčinky. Aby materiál dobře přilnul, musí být součást důkladně očištěna.
- **Plazmové svařování** se využívá pro svařování ocelí, litin, bronzu, hořčíku, mosazi a speciálních slitin. Nejčastěji se používají hořáky s plynnou stabilizací. Plazmové svařování se využívá i v jemné mechanice a takové svařování se nazývá „svařování mikroplazmou“.
- **Obrábění plazmou.** Pomocí plazmy lze obrábět dvěma způsoby. Prvním způsobem je ohřívání před oddělováním třísky. Při tomto způsobu jsou malé řezné síly, a tak mnohonásobně zvyšujeme trvanlivost nástroje. Dále máme přímé obrábění, které odebírá třísku postupným odtavováním materiálu. Metoda se používá výhradně pro hrubování. Povrch obrobku má vysokou drsnost a je teplotně ovlivňován. [16]

## 5.2 Plazmové řezání

**Plazmové řezání** se začalo používat v 50. letech 20. století, pro řezání neželezných kovů a slitin. Postupem času a vývoje se začalo plazmového řezání využívat více. A to především díky vysoké rychlosti plazmového řezání a nižšímu teplotnímu ovlivnění.

Při plazmovém řezání se dělí materiál pomocí vysoké teploty, která je díky vytvoření plazmy v elektrickém oblouku vysoká až 33 000 °C. Přestupnost tepla do materiálu tohoto řezání je až 68,7 MW/m<sup>2</sup>. Převážně díky těmto parametrům se ustupuje technologii řezání kyslíkovým plamenem. V některých oblastech strojírenství už plazma nahrazuje metody řezání kyslíkovým plamenem. [11]

Při řezání plazmou se používají tyto plyny:

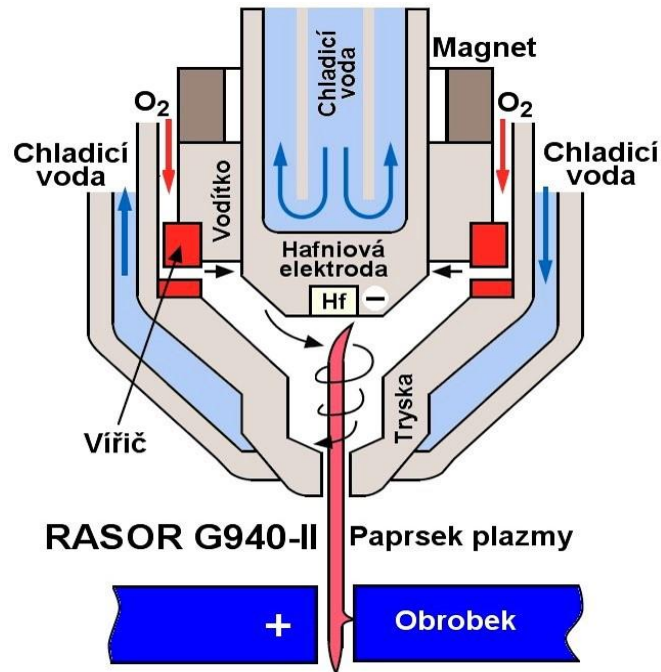
- **Plazmové plyny** - přivádí se do elektrického oblouku, kde dochází k ionizaci. Používá se argon, helium, dusík, směs argon + vodík nebo stlačený vzduch.
- **Fokusační plyny** - mají za úkol zaostřit paprsek plazmatu po jeho výstupu z trysky hořáku. Používá se argon, dusík, směs argon + vodík nebo argon + dusík.
- **Asistentní plyny** - jsou kolem paprsku plazmatu a řezaného místa. Chrání je před účinkem atmosféry. Používá se argon a dusík.

Přístroj pro řezání paprskem plazmy se skládá ze zdroje energie, ionizátoru, plazmového hořáku a řídicí jednotky nejčastěji CNC.

Plazmové hořáky jsou základní součástí plazmového stroje. Dochází v nich k přeměně elektrické energie na tepelnou energii a k usměrnění toku plazmy. Hořáky se dělí podle stabilizace elektrického oblouku. [1]

Plazmové hořáky musí zabezpečovat:

- přívod pracovních plynů,
- vytvarování plazmového oblouku,
- usměrnění paprsku plazmy do bodu řezání.



Obr. 6. Schéma plazmového hořáku [14]

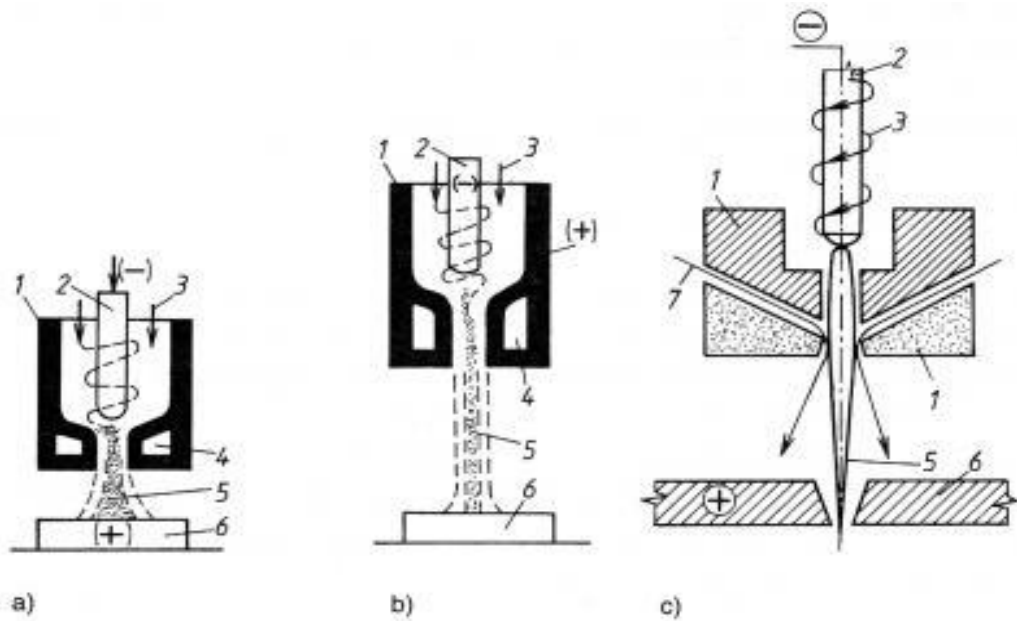
Plazmové hořáky se podle druhu stabilizačního média dělí na:

- **Plazmové hořáky s plynovou stabilizací**

- a) S transformovaným obloukem: u tohoto typu hoří elektrický oblouk mezi vnitřní elektrodou a obráběným materiálem, toto se většinou využívá při řezání neželezných kovů.
- b) S netransformovaným obloukem: v tomto typu hoří elektrický oblouk mezi vnitřní elektrodou a výstupní tryskou, využívá se u řezání keramiky nebo k nanášení povlaků.

- **Plazmové hořáky s vodní stabilizací**

Plazmové hořáky s vodní stabilizací se liší v tom, že řezací tryska má kanálky pro vstřikování vody do plazmového hořáku. Velkou výhodou je, že řezáním pod vodou snížíme hlučnost, prašnost a vliv UV záření na obsluhu. [16]



Obr. 7. Druhy plazmových hořáků [16]

a) s plynovou stabilizací s transformovaným obloukem, b) s plynovou stabilizací s netransformovaným obloukem, c) s vodní stabilizací  
 1 – těleso hořáku, 2 – katoda, 3 – přívod plynu (argon), 4 – chlazení hořáku, 5 – paprsek plazmy, 6 – obrobek, 7 – přívod vody

### Plazmové řezání pomocí stlačeného vzduchu

Stlačený vzduch se důsledkem vysokých teplot rozdělí na svoje elementární složky. Pro řezání stlačeným vzduchem musí být materiály elektricky vodivé kvůli elektrickému výboji, který je mezi materiálem a hořákem stroje. Řezání pomocí stlačeného vzduchu je nejpoužívanější v praxi. Především z důvodu nízkých nákladů na provozní plyny a vyšších řezných rychlostí. [11]

### Výhody a nevýhody plazmového řezání

#### Výhody:

- lepší kvalita řezu ve srovnání s řezáním plamenem,
- vysoké řezné rychlosti,
- méně nákladnější než laser při řezání tenkých plechů.



Nevýhody:

- vysoké náklady proti řezání plamenem,
- nekvalitní povrch proti laseru,
- menší rozměrová přesnost proti laseru,
- vysoká hlučnost,
- velké množství nebezpečných výparů.

### 5.3 Bezpečnost práce

Pracoviště pro řezání plazmovým paprskem musí být uzpůsobeno bezpečnosti a hygieně. Především kvůli vytváření značného množství jedovatých kovových aerosolů, vysoké hlučnosti a intenzivního záření. Při práci na plazmových strojích vzniká velmi velké množství prachu, proto musí být pracoviště obstaráno výkonným odsáváním. Je důležité dbát na riziko popálení, a také na nebezpečí vzniku požáru. [2]



Obr. 8. Stroj pro CNC řezání plazmou [14]

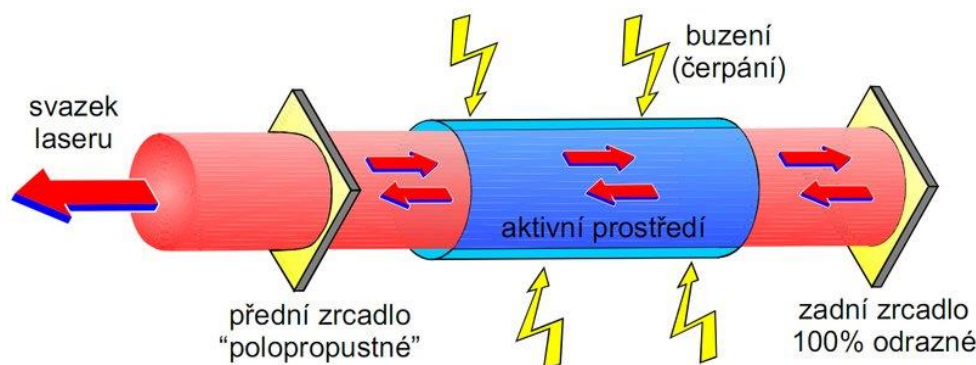
## 6 LASER (LBM)

Laser nepochybně patří mezi největší objevy světa jako jsou například parní stroj, elektrický proud, štěpení atomového jádra atd. Jako první navrhli laser v roce 1958 C. H. Towns a A. L. Shawlow. V roce 1960 T. H. Maiman zkonstruoval první rubínový laser. Vědci pak dále objevovali nové typy laserů jako např. pevnolátkový laser, polovodičový laser, avšak také plynový CO<sub>2</sub> laser, který je v dnešní době nejpoužívanější. Slovo **LASER** je vzniklé z anglického názvu **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation do českého překladu to znamená zesílení světla pomocí vybuzené emise záření. Toto slovo se používá pro všechna zařízení, která fungují na principu stimulované emise záření. Princip vzniku indukované emise si můžeme vysvětlit pomocí kvantové fyziky a planetárního modelu atomu, který navrhl Niels Bohr. Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Ale laserové světlo vzniká v prostředí stimulujícího elektromagnetického záření potlačením samovolné emise. Samovolná emise vzniká, když vybuzené atomy s energetickou hladinou E<sub>2</sub> mají snahu vzít hladinu s nižší energií E<sub>1</sub>. Přitom emitují kvantum světelného záření s frekvencí  $\nu$ , což vyplývá z rovnice:

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu$$

kde  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s; což je Planckova konstanta.

Atom se nachází v základním stavu pouze při základních podmínkách. Elektronový přechod ze základní energetické hladiny na vyšší hladinu je doprovázen absorbcí. Přechod z vyšší energetické hladiny na základní je doprovázen emisí, při které vzniká energie. Energie je poté vyzařována pomocí laserového svazku. K tomu je zapotřebí ještě vytvořit tzv. optický rezonátor, který je nejčastěji tvořen odrazovými zrcadly. [11] [7]



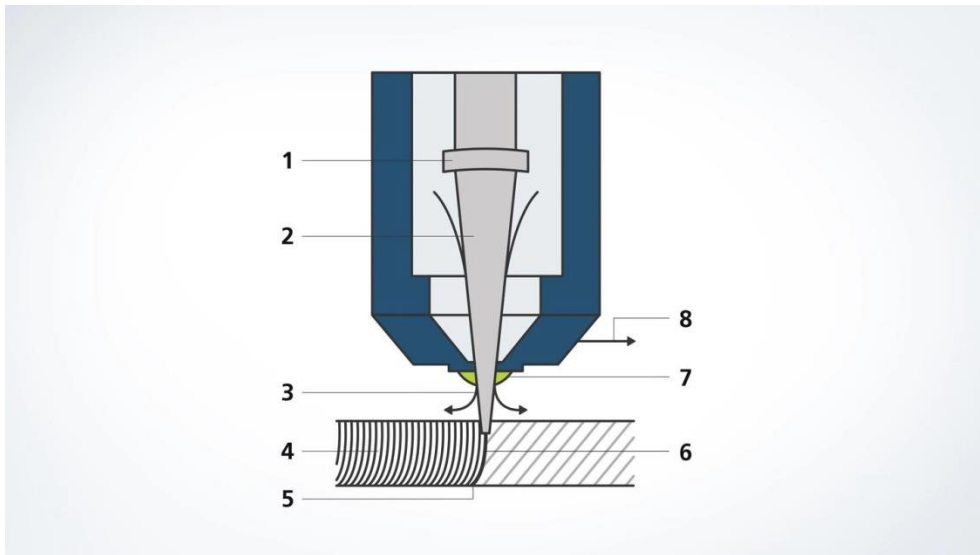
Obr. 9. Schéma laseru [12]

Můžeme říci, že laser je kvantovo elektrický zesilovač a generátor světelných vln, který využívá tzv. stimulovanou emisi záření na produkci světelného paprsku.

Vlastnosti světelného paprsku:

- je vysoko monochromatický,
- má vysoký stupeň prostorové a časové koherence,
- má minimální rozbíhavost,
- má vysokou výstupní intenzitu.

Tyto vlastnosti umožňují laserovému paprsku při fokusaci soustředit vysokou hustotu energie do malého bodu v místě dopadu paprsku. Zde se začne materiál natavovat až odpařovat. [13]



Obr. 10. Schéma laserového obrábění [10]

1 – zaostřovací optika, 2 – laserový paprsek, 3 – řezný plyn, 4 – řezná spára, 5 – tavenina, 6 – čelní strana obrobku, 7 – tryska, 8 – směr řezu

## 6.1 Rozdělení laserů

Podle laserového média:

- **Pevnolátkové lasery** - jako laserové médium je krystal ve tvaru hranolu, válce nebo kotouče. Čelní strany krystalu jsou vyleštěny. Krystal je nejčastěji vyroben z rubínu, lithium-yttrium-fluoridu nebo yttrium-aluminium-granátu. Pevnolátkový laser má účinnost 3 - 8 %.
- **Plynové lasery** - jako laserové médium je směs plynů. Nejvýznamější a nejpoužívanější jsou CO<sub>2</sub> lasery, u kterých je médium tvořeno plyny oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>), dusíku (N<sub>2</sub>) a hélia (He). CO<sub>2</sub> laser má účinnost 10 – 15 %. Další plynové lasery jsou např. helium-neonový laser, měděný laser, argonový laser, helium-kadmiový laser a excimerový laser.
- **Polovodičové lasery** - princip je založený na vzniku stimulované emise v polovodičovém materiálu. Oproti jiným laserům dochází k přechodu elektronů mezi energetickými pásy a ne mezi energetickými hladinami. Laserové médium se nejčastěji používá galium arsenid, kadmium sulfid a kadmium selen. Tyto lasery pracují s účinností až 50 %.
- **Kapalinové lasery** - mají jako laserové médium roztok organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny, které jsou doplňovány ionty vzácných zemin. Použití kapalinových laserů je ve spektroskopii z důvodu přesné vlnové délky. Účinnost je převážně v řádech desítek.

Podle vlnové délky:

- infračervené záření,
- světelné záření,
- ultrafialové záření,
- rentgenové a gama záření.

Podle druhu paprsku:

- v kontinuálním režimu,
- v pulzním režimu.

Podle konstrukce laserového zařízení:

- konstrukce, při které je hlava laseru pevně upevněna a pohybuje se obrobek,
- konstrukce, při které je obrobek pevně upevněn a laserová hlava se pohybuje.

## 6.2 Použití laserů v praxi

### Popisování součástí

Popisování můžeme provádět dvěma základními způsoby, a to buď přes masku nebo vychylováním paprsku laseru. Při metodě přes masku je potřebný text vyříznut v masce vyrobené z mosazi, bronzu nebo z ušlechtilé oceli. Při osvětlení paprskem laseru se text přenesse na obrobek a zakrytá místa maskou zůstanou čistá. Nevýhodou je, že při změně popisovaného textu se musí vyrábět nová maska, a to zvyšuje náklady. Využívá se nejčastěji u velkých sérií např. obaly, etikety apod. Při metodě vychylováním paprskem je paprsek vychylován dvěma zrcadly, které jsou na sebe kolmé a jejich pohyb řídí počítač. Výhodou je vysoká kvalita značení a velmi rychlá změna textu, protože se nemusí vyrábět maska, ale změní se jen program označování. [11]

### Svařování pomocí laseru

Svařování můžeme provádět CO<sub>2</sub> lasery nebo Nd:YAG lasery. Přídavný materiál se většinou při těchto metodách nepoužívá. Výhodou tohoto svařování je malá tepelná ovlivnění v okolí svaru. A také možnost svařování všech materiálů, které jdou svařit konvenčními metodami. Svařovat lze buď ručně nebo pomocí robotů, kteří mají na konci mechanického ramena umístěnou pracovní hlavu pro svařování. [15]

### Tepelné zpracování

Při tepelném zpracování laserem je materiál ohříván velmi krátkou dobu. Při kalení nemusíme použít chladicí médium, protože se podmínky dají seřídít pomocí změny parametrů laseru a rychlostí pohybu obrobků.

### Nanášení povlaků

Materiál, který nanášíme je do paprsku přiváděn jako prášek nebo jako drát. Poté co je přiveden do paprsku, tak se začne tavit a nanášet na povrch součásti, kde dojde ke ztuhnutí. Povlak může mít tloušťku až 1 mm, má dobrou přilnavost k povrchu součásti a je bez jakýchkoliv trhlin.

## Vrtání

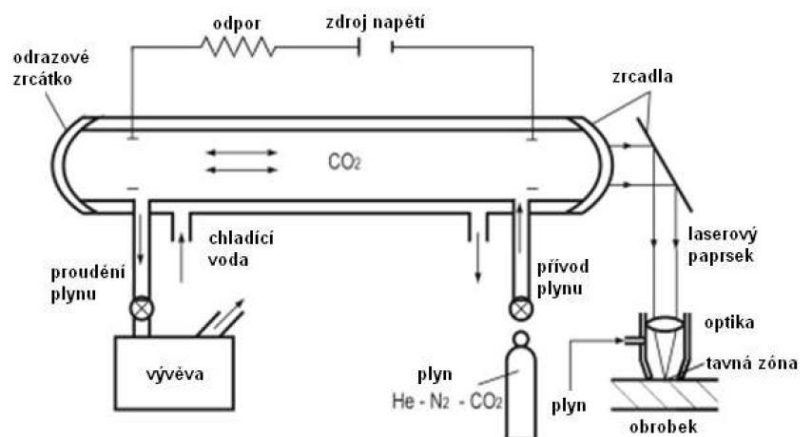
Vrtání pomocí laseru se využívá pro vrtání malých otvorů do materiálů, které jsou těžce obrobitelné kovové i nekovové. Otvory mohou být i kruhové i tvarové. Vrtání probíhá v pulzním nastavení, při kterém laser vysílá vysokou intenzitou jednotlivé pulzy. [3]

## Soustružení (frézování)

Pomocí laseru se dá soustružit (frézovat) třemi způsoby. Nejpoužívanější je metoda s **předehřevem**, kde se materiál nahřívá pro zlepšení mechanických vlastností, a tím pádem zlepšení obrobitelnosti. Paprsek musí být nasměřován těsně před břit nástroje. Další metodou je **odtavování materiálu z povrchu obrobku**. Působením vysokého tepla na obrobek se materiál začne tavit, a díky asistentnímu plynu je materiál odfouknut z místa obrábění. A jako poslední je metoda s **dvěma různoběžnými paprsky laseru**, při které máme dva paprsky laseru vůči sobě pootočený o určitý úhel. A díky jednomu společnému bodu, kde se paprsky protnou, se odebíraný materiál oddělí od obrobku. [16]

## Řezání materiálu pomocí laseru

Řezání je nejpoužívanější laserovou technologií. Především díky své univerzálnosti, rychlosti a přesnosti. Laserové řezání se používá jak v malosériové výrobě, tak i při velkých sériích. Pro řezání se nejčastěji používají CO<sub>2</sub> lasery v kontinuálním režimu. Laserový paprsek je k místu řezu přiveden několika zrcadly a je pomocí čočky v řezací hlavě zaostřen do velmi tenkého paprsku. Volba přídavného plynu závisí na materiálu řezaného dílu. Pro kovy a uhlíkové oceli se používá kyslík, vzduch a pro nekovy a plasty se nejčastěji používá dusík. Protože dusík chrání řezné plochy před spálením a vznícením. [9]



Obr. 11. CO<sub>2</sub> Laser [12]

Existují tři způsoby řezání:

- **sublimační řezání** - laserový paprsek ohřívá materiál v místě řezu na tak vysokou teplotu, že se materiál z čela řezu odpařuje. Tento způsob je vhodný jen pro malé tloušťky plechu.
- **tavné řezání** - materiál je ohříván jen na teplotu tavení a asistentním plynem je odfukován z místa řezu. Nevýhodou je horší kvalita řezu způsobená kapkami taveniny na spodní straně řezu.
- **řezání pálením** - materiál se rozežřeje na zápalnou teplotu a po přívodu reaktivního plynu za pomoci exotermické reakce začne hořet, struska je odstraňována pomocí asistentního plynu. Kvalita řezu je velmi vysoká. [6]

Kvalita řezu záleží na:

1. Navolených parametrech
  - výkon laseru
  - rychlost posuvu
  - druh paprsku
  - ohnisková vzdálenost
  - průměr fokusovaného paprsku
  - tlak přídavného plynu
  - vzdálenost trysky od materiálu
2. Parametrech obráběného materiálu
  - fyzikálně- chemické vlastnosti materiálu
  - druh materiálu (kompozit, sklo, keramika, ...)
  - tepelná vodivost materiálu
  - geometrie obrobku

### 3. Seřízení stroje

- vystředění paprsku vůči trysce
- očištění zrcadel i čočky
- opotřebení keramiky i trysky
- seřízení fokusu stroje

### Výhody a nevýhody laseru

#### Výhody:

- možnost obrábění různých druhů materiálů,
- úzká spára řezu, díky které se získávají ostré hrany,
- vysoké řezné rychlosti oproti podobným typům řezání,
- deformace vyráběných dílů je minimální,
- velmi dobrá rozměrová přesnost,
- dobrá kvalita povrchu řezu.

#### Nevýhody:

- nákladný provoz,
- vysoká pořizovací cena.



### 6.3 Bezpečnost práce

Využití laseru sice sahá do mnoha odvětví, ale je důležité znát i rizika nebezpečí s ním spojené. Mezi první ohrožení patří skutečnost, že zařízení, které využívají laserové technologie, pracují s velmi vysokými teplotami. Díky nim je stejně jako u plazmových strojů velké riziko popálení nebo dokonce i vzniku požáru. Další rizika spojené s laserovými stroji jsou způsobeny toxickými výpary, zvýšeným hlukem, emisí záření a světelným ozářením. [11]



*Obr. 12. Stroj pro řezání laserem [10]*

## 7 CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE

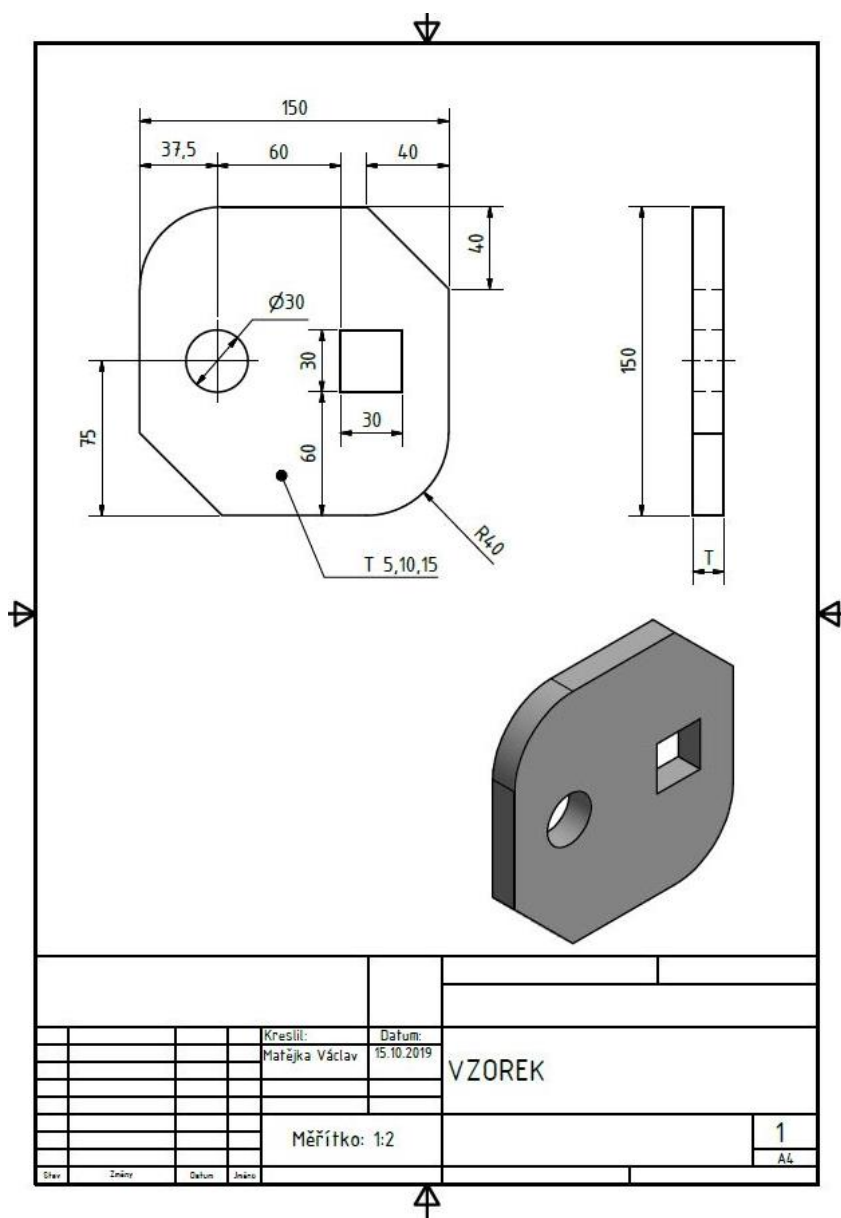
V návaznosti na literární řešení bude provedeno:

- výroba vzorků ve firmě HP - KOVO a KS – KOVO,
- měření rozměrů ve dvou rovinách pro zjištění úkosu obvodu,
- měření rozměrů ve dvou rovinách pro zjištění úkosu díry,
- měření drsnosti povrchu řezu,
- porovnání technologií.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 8 POUŽITÉ VZORKY A MĚŘENÉ VELIČINY

Měřené vzorky z různých tlouštěk materiálu byly vyrobeny na laserovém stroji ve firmě HP – KOVO. Poté byly ze stejných tabulí vyrobeny vzorky na plazmovém stroji ve firmě KS – KOVO. Vzorky jsou vyrobeny tak, abychom na nich mohli dobře porovnávat laserovou technologii s plazmovou. Na vzorcích můžeme vidět vyřezání jak kruhových, tak čtyřhranných otvorů, nebo také zaoblení a zkosení hran. Vzorky nejsou použitelné dílce, slouží pouze pro laboratorní účely.



Obr. 13. Výkres vzorku

## 8.1 Materiál vzorků

Vzorky byly vyrobeny ze stejné třídy oceli 11 373. Kvůli eliminaci rozdílných struktur materiálu, byly vzorky vyrobeny i ze stejných desek. Použité desky jsme zvolili v tloušťkách 5, 10 a 15 mm.

### 8.1.1 Ocel 11 373

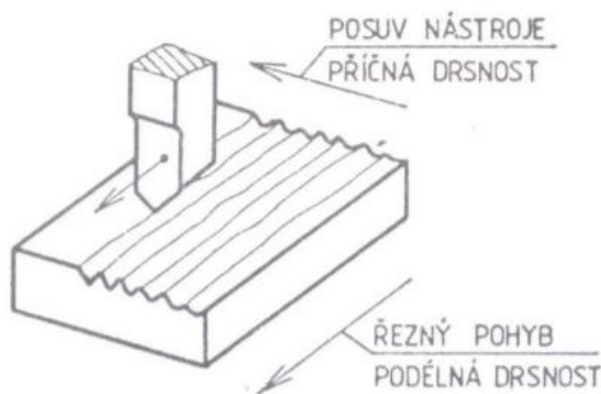
Nelegovaná ocel 11 373 se skládá maximálně z 0,17 % uhlíku a z dalších příměsí prvků jako jsou např. fosfor, síra a dusík. Ocel je vhodná pro tavné svařování a kovárenské svařování, ale také se používá pro součásti konstrukcí, strojů apod.

## 8.2 Měřené veličiny

Pro porovnání vzorků byly měřeny tyto veličiny: drsnost povrchu řezu, úkos řezu a jakost povrchu řezu. Měřené veličiny byly zvoleny tak, aby byl dobře vidět rozdíl mezi laserovou a plazmovou technologií.

### 8.2.1 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je souhrn nerovností na obráběném povrchu, které vytvoří nástroj podle určitého způsobu obrábění. Kvalita drsnosti se vyhodnocuje v příčném a podélném směru. Drsnost v příčném směru se měří v kolmém směru na řezný pohyb nástroje. V podélném směru se měří rovnoběžně na řezný pohyb nástroje. Oba směry můžeme vidět níže na obrázku číslo 14.



Obr. 14. Směry vyhodnocení drsnosti povrchu [8]

Povrch materiálu se často rozděluje na: **drsnost, vlnitost a základní profil.**

### **Drsnost**

Je základním měřeným parametrem u měření povrchu materiálu. Vzniká po oddělení vlnitosti a základního profilu. Drsnost materiálu pak můžeme měřit v různých parametrech např. Ra, Rz, Rt, ... Všechny tyto parametry mají číselnou hodnotu, která je měřena v [ $\mu\text{m}$ ] a zapisujeme je např. Ra 3,2.

### **8.2.2 Úkos**

Při řezání materiálu paprskovou metodou (laser a plazma), paprsek ztrácí svou energii převážně kvůli vzniklému tření. Ztráta energie způsobuje vychýlení paprsku, který poté způsobuje vychýlení kolmosti řezu, které nazýváme úkosem (kuželovitostí) a také způsobuje viditelné rýhování na povrchu řezu.

## 9 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ PRO VÝROBU A MĚŘENÍ VZORKŮ

Vzorky byly vyrobeny na dvou CNC řízených strojích. Tři vzorky byly vyrobeny na laseru ve firmě HP – KOVO a další tři vzorky byly vyrobeny na plazmě ve firmě KS – KOVO. Při řezání se používaly řezné podmínky stanoveny jednotlivými firmami. Všechny vzorky byly měřeny na měřicích zařízeních ve školních laboratořích. Měření i výroba probíhaly při odborném dohledu.

### 9.1 Laser

Pro vyrobení vzorků laserovým paprskem byl použit laserový stroj od výrobce TRUMPF, který má přesné označení Trulaser 3030. Stroj dokáže vyrábět z plechových tabulí s maximálním rozměrem 3000 x 1500 mm. Maximální výkon zařízení je 3200 W. Při řezání se využívá dvou řezných plynů. Pro ocel se využívá kyslík a pro nerezavějící ocel a hliník používáme dusík. Největší tloušťka řezané desky pro ocel je 20 mm, pro nerezavějící ocel 12 mm a pro hliník a jeho slitiny pouze 8 mm. Chladicím médiem celého stroje je ionizovaná voda, která obíhá ve dvou okruzích. Pro mazání vedení posuvů je používané centrální automatické mazání. Zařízení pracuje s přesností  $\pm 0,1$  mm.

Při výrobě byla použita řezací hlava s čočkou o velikosti 9,8 palců. Pro každou tloušťku plechu byla použita tryska s jiným průměrem otvoru. Řezné podmínky, které byly použity při výrobě vzorků, jsou uvedené níže v tabulce číslo 1.

*Tabulka 1 - Řezné podmínky pro řezání laserem*

Řezné podmínky - LASER		
Síla plechu [mm]	Řezný výkon [w]	Řezná rychlost [m/min]
5	2500	2,8
10	2800	1,3
15	2900	0,8



*Obr. 15. Použitý laserový stroj*



*Obr. 16. Použitá řezací hlava*



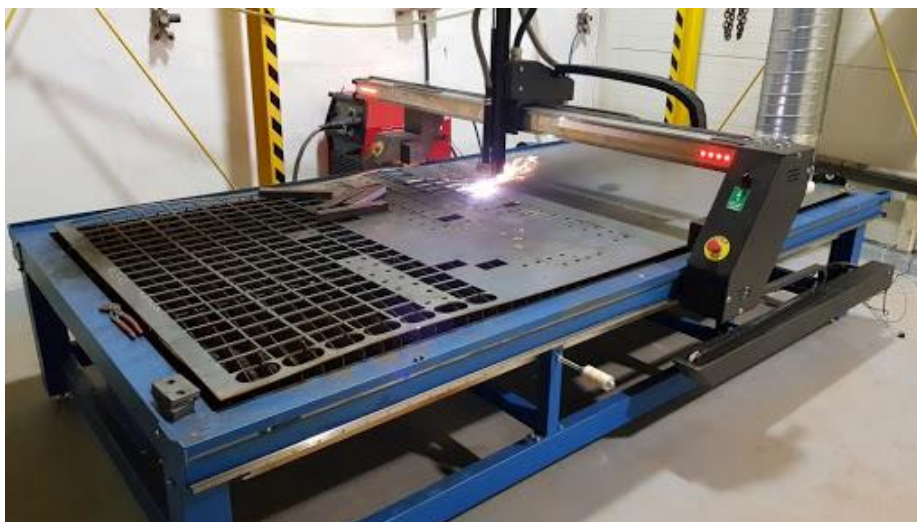
## 9.2 Plazma

Pro výrobu vzorků plazmovým paprskem byl použit plazmový stroj od výrobce CYBERTRONIC. Stroj se skládá z agregátoru ALFA – IN PEGAS 101 a routeru (stolu) od firmy Cybertronic. Zařízení dokáže zpracovávat plechové tabule o velikosti 3000 x 1500 mm. Firma stroj využívá k výrobě nejrůznějších tvarů, a to nejčastěji pro svařování konstrukcí. Řezaný materiál může být ocel, hliník nebo nerezavějící ocel. Maximální tloušťka řezaného materiálu je 20 mm s přesností  $\pm 0,6$  mm. Router je vybaven i rotační osou, do které je možné upnout trubku o průměr až 800 mm.

Pro výrobu vzorků byl použit jako řezný plyn stlačený vzduch. Pro každou tloušťku bylo použito jiné složení hořáku. Řezné podmínky jsou uvedené níže v tabulce číslo 2.

*Tabulka 2 - Řezné podmínky pro řezání plazmou*

Řezné podmínky - PLAZMA		
Síla plechu [mm]	Proud na agregátoru [A]	Řezná rychlost [m/min]
5	52	1,7
10	72	0,95
15	80	0,68



*Obr. 17. Použitý plazmový stroj*

### 9.3 Drsnoměr

K měření drsnosti povrchu byl použit univerzální drsnoměr od firmy Taylor Hobson. Použitý typ zařízení byl Taylor Hobson Talysurf CLI 500, který slouží pro bezdotykové měření drsnosti povrchu všech materiálů a povrchů. K základnímu přístrojovému vybavení je firemní program Talymap Gold. Dané měřicí zařízení zaznamenává data pomocí bezdotykové sondy s CLA konfokální hlavou. Je využíván především pro 3D měření, avšak je možno bezproblémově změřit i 2D data.

#### Parametry zařízení:

- Hmotnost: 55 kg
- Nosnost: 10 kg
- Rychlost měření: 30 mm/s, 15 mm/s, 10 mm/s, 5, 1 mm/s a 0,5 mm/s
- Rychlost polohování: 30 mm/s (max.)

### 9.4 Univerzální mikroskop

Pro vytvoření snímku řezaného povrchu materiálu byl použit univerzální dílenský mikroskop CARL ZEISS, jehož optický systém je pohyblivý pomocí mikrometrického posuvného šroubu s hodnotou dělení 0,01 mm. Pro nasvícení vzorků bylo využito externí diodové lampičky. K upnutí vzorků na stole mikroskopu byla použita speciální plastelína.

### 9.5 Posuvné měřítko

Úkos řezu vzorků se měřila pomocí digitálního posuvného měřítka od firmy UNI - MAX. Přístroj má rozsah měření 150 mm a rozlišitelnost 0,01 mm. Používá se nejčastěji pro měření vnějších obrysů, ale může se použít i pro měření děr nebo hloubky.

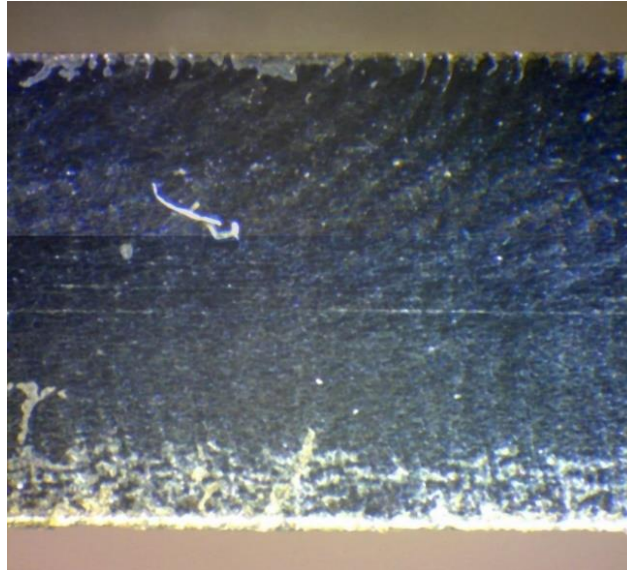
## 10 VYHODNOCENÍ JAKOSTI ŘEZU

Vzorky obráběné pomocí plazmy i CO<sub>2</sub> laseru byly vyfoceny na univerzálním mikroskopu CARL ZEISS s desetinásobným zvětšením. Řezné hrany těchto vzorků byly dále vyhodnoceny na drsnoměru firmy Taylor Hobson pro bezdotykové měření drsnosti povrchu. Jakost povrchu byla měřena pouze na vzorcích o tloušťce 5 mm a 10 mm, vzorky tloušťky 15 mm měly již na vstupu a výstupu paprsku velmi rozdílné hodnoty drsnosti, a proto nebylo vhodné na těchto dělicích řezech měřit střední aritmetickou úchylku Ra, neboť hodnoty by byly značně zkreslené.

Od následující strany bude uvedena fotografie 10 x zvětšeného řezu. A pod ní bude tabulka s vyhodnocenými naměřenými hodnotami.

## 10.1 Vyhodnocení výsledků jakosti řezu u vzorků vyrobených plazmou

### 10.1.1 Tloušťka 5 mm, obráběná plazmou

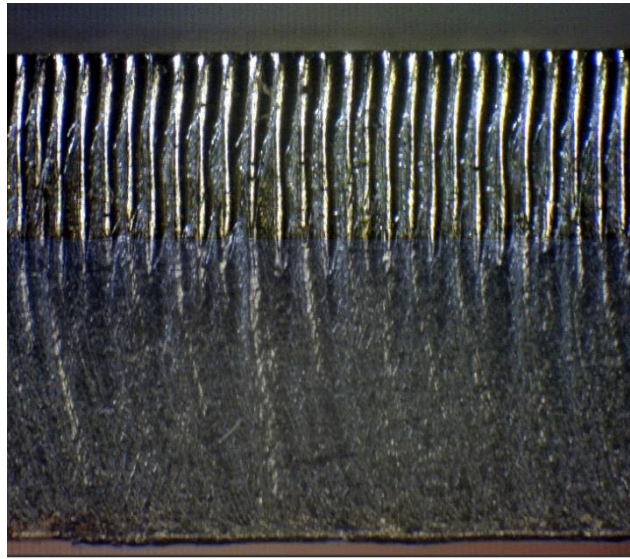


Obr. 18. Řez materiálu 11 373 tloušťka 5 mm, obrábění plazmou

Tabulka 3 - Hodnoty drsnosti pro obrábění plazmou, tl. 5 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 5 mm				
Parametr	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
R <sub>p</sub> [μm]	3	0,8	1,9	5,4
R <sub>v</sub> [μm]	2,9	0,7	1,6	5,2
R <sub>z</sub> [μm]	5,8	1,4	3,7	9,7
R <sub>c</sub> [μm]	4	1,2	1,9	7,7
R <sub>t</sub> [μm]	8,2	2,4	4,6	21
R <sub>a</sub> [μm]	1,3	0,3	0,7	2,1
R <sub>q</sub> [μm]	1,5	0,4	0,9	2,5
R <sub>sk</sub>	0,1	0,4	-1,3	1,2
R <sub>ku</sub>	3,2	0,8	2,1	7,6

## 10.1.2 Tloušťka 10 mm, obráběná plazmou



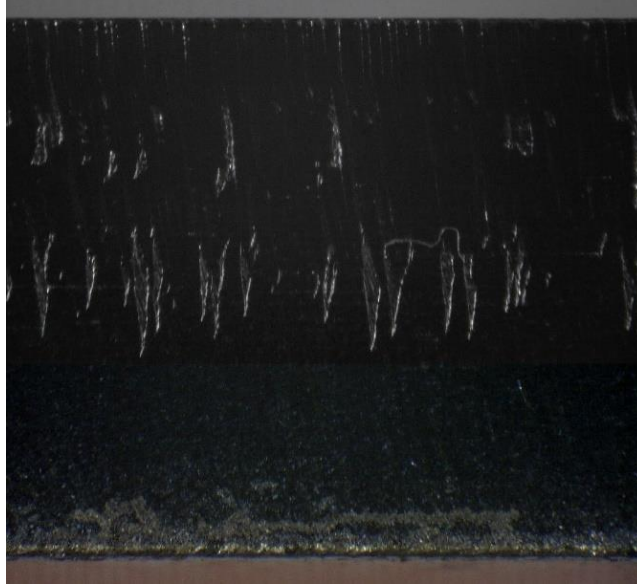
Obr. 19. Řez materiálu 11 373 tloušťka 10 mm, obrábění plazmou

Tabulka 4 - Hodnoty drsnosti pro obrábění plazmou, tl. 10 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 10 mm				
Parametr	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp [μm]	16,5	7,1	3,8	32,2
Rv [μm]	13,6	4,7	3,5	22,2
Rz [μm]	30,1	11,6	8,5	53,2
Rc [μm]	22,9	9,4	5,3	41,6
Rt [μm]	40,4	17,8	10,5	131,5
Ra [μm]	7,2	2,8	1,7	12,7
Rq [μm]	8,5	3,3	2,1	15,1
Rsk	0,2	0,2	-0,5	1,7
Rku	2,8	0,7	2	9,1

## 10.2 Vyhodnocení výsledků jakosti řezu u vzorků vyrobených laserem

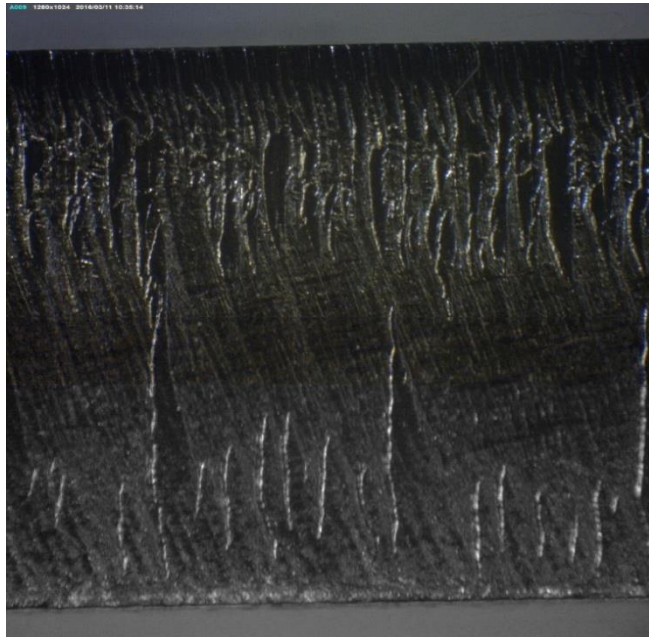
### 10.2.1 Tloušťka 5 mm, obráběná CO<sub>2</sub> laserem



Obr. 20. Řez materiálu 11 373 tloušťka 5 mm, obrábění CO<sub>2</sub> laserem

Tabulka 5 - Hodnoty drsnosti pro obrábění CO<sub>2</sub> laserem, tl. 5 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 5 mm				
Parametr	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
R <sub>p</sub> [μm]	3,8	2,1	1,7	21,1
R <sub>v</sub> [μm]	3,8	1,2	1,8	7,9
R <sub>z</sub> [μm]	7,6	3,1	3,5	27,8
R <sub>c</sub> [μm]	5,3	2,4	2,3	26,6
R <sub>t</sub> [μm]	12,6	10,4	4,7	106,8
R <sub>a</sub> [μm]	1,5	0,5	0,8	3,8
R <sub>q</sub> [μm]	1,9	0,7	0,9	6,3
R <sub>sk</sub>	0,3	2	-5,9	18,2
R <sub>ku</sub>	7,5	20,3	2,2	207,9

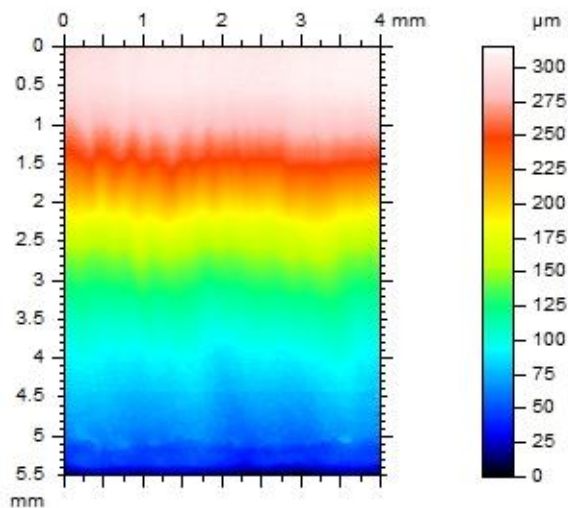
10.2.2 Tloušťka 10 mm, obráběná CO<sub>2</sub> laseremObr. 21. Řez materiálu 11 373 tloušťka 10 mm, obrábění CO<sub>2</sub> laseremTabulka 6 - Hodnoty drsnosti pro obrábění CO<sub>2</sub> laserem, tl. 10 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 10 mm				
Parametr	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
R <sub>p</sub> [μm]	5,5	2,9	1,8	12,8
R <sub>v</sub> [μm]	5,1	2,1	2	10
R <sub>z</sub> [μm]	10,6	4,9	4,1	21,6
R <sub>c</sub> [μm]	7,6	4,5	2,2	19,3
R <sub>t</sub> [μm]	15	6,6	5,3	30,7
R <sub>a</sub> [μm]	2,3	1,3	0,8	5,5
R <sub>q</sub> [μm]	2,8	1,5	1	6,3
R <sub>sk</sub>	0	0,5	-1,7	3
R <sub>ku</sub>	3,7	1,6	2,2	24,1

### 10.3 Zhodnocení a porovnání jakosti řezu u vzorků řezaných na CO<sub>2</sub> laseru a plazmě

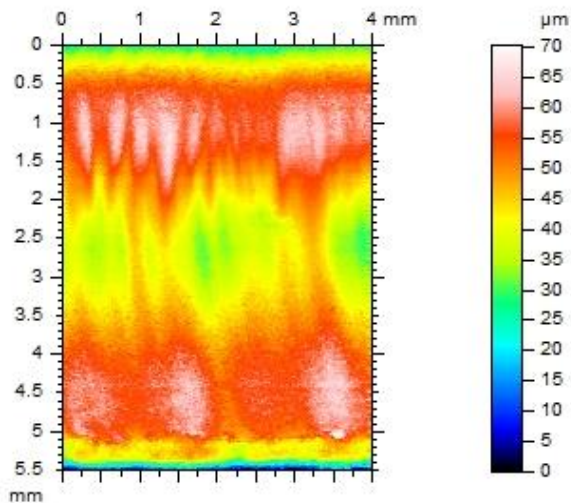
V následující kapitole jsou graficky vyhodnocené řezy pro laserovou technologii a plazmu. V další části jsou k sobě přiloženy 3D modely obroběných povrchů obráběných na CO<sub>2</sub> laseru a plazmou, s cílem porovnání jakosti obráběného povrchu. Toto srovnání bylo provedeno pouze pro tloušťku materiálu 5 mm. V modelu je z levé strany od 0 do 4 mm oskenovaný povrch materiálu obroběného na CO<sub>2</sub> laseru a od 4 mm do 8 mm je naskenovaný povrch materiálu tloušťky 5 mm obroběného plazmou. Na ose X je udán směr řezu materiálu, osa Y udává hloubku řezu materiálu a osa Z udává nerovnosti řezaného povrchu.

#### 10.3.1 Tloušťka 5 mm, obráběná plazmou

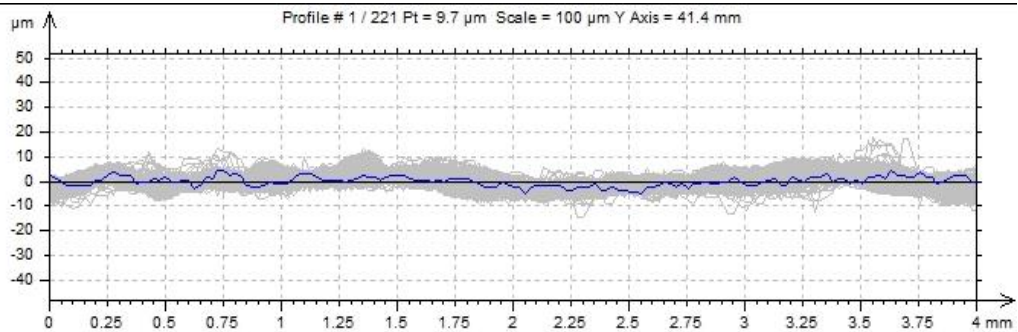


Obr. 22. Drsnost obroběného povrchu materiálu 11 373, tloušťka 5 mm, obrábění plazmou



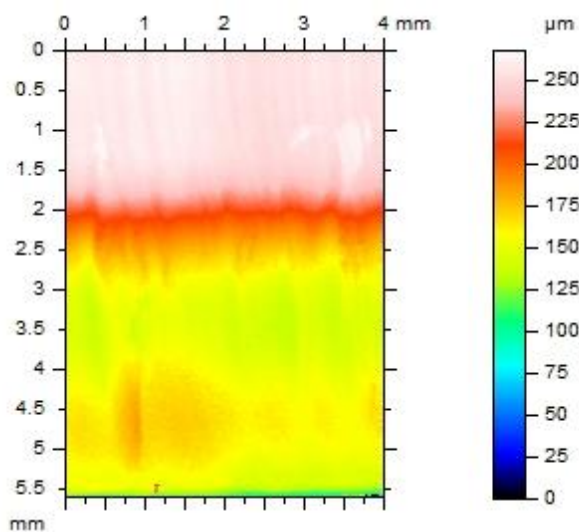


Obr. 23. Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 373 tloušťka 5 mm s odfiltrovanou vlnitostí, obrábění plazmou

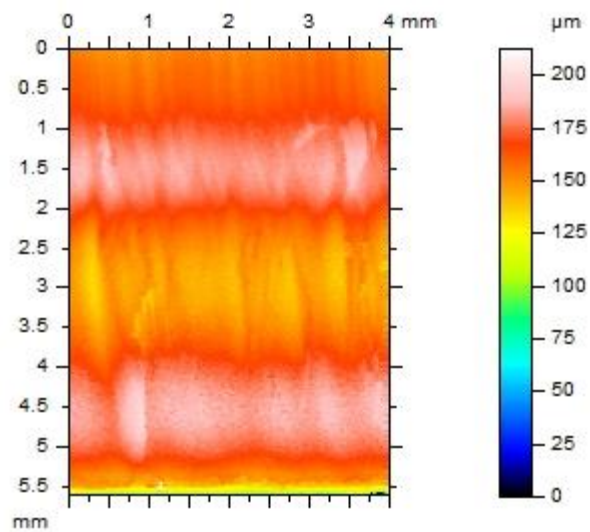


Obr. 24. Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 11 373 tloušťka 5 mm, obrábění plazmou

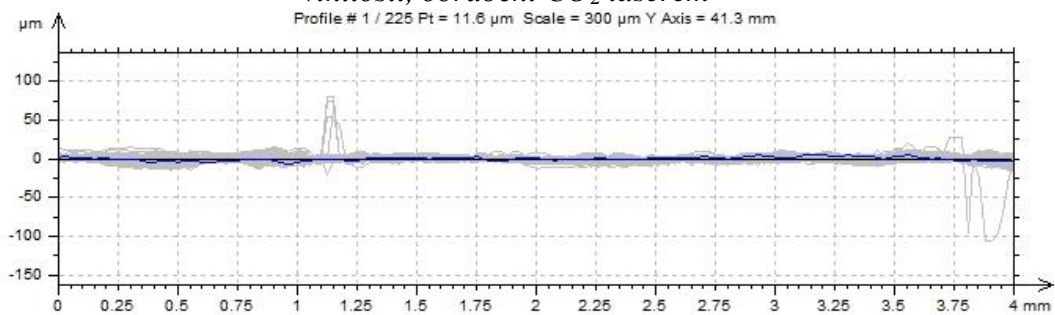
### 10.3.2 Tloušťka 5 mm, obráběná CO<sub>2</sub> laserem



Obr. 25. Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 373 tloušťka 5 mm obrábění CO<sub>2</sub> laserem

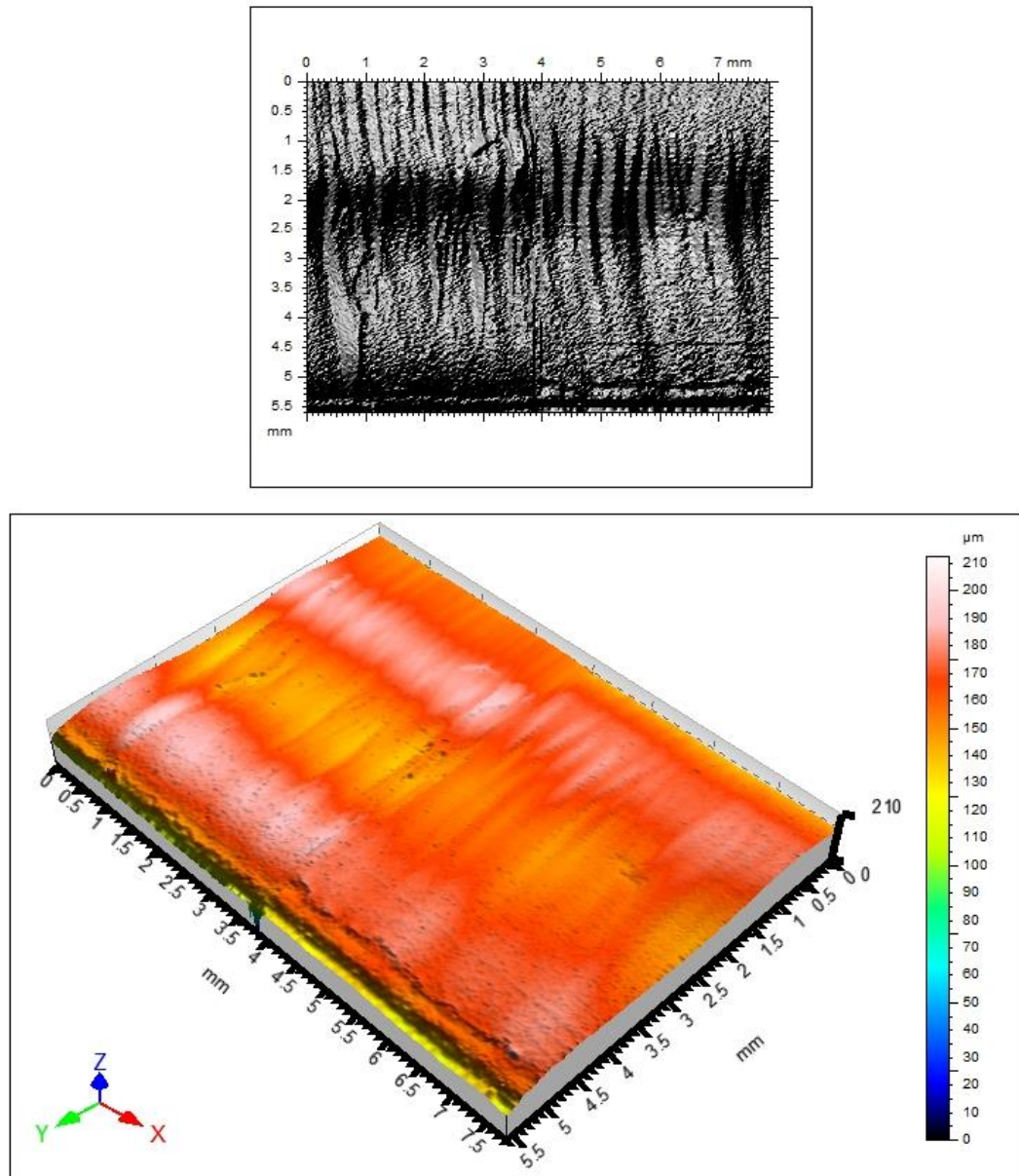


Obr. 26. Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 373 tloušťka 5 mm s odfiltrovanou vlnitostí, obrábění CO<sub>2</sub> laserem

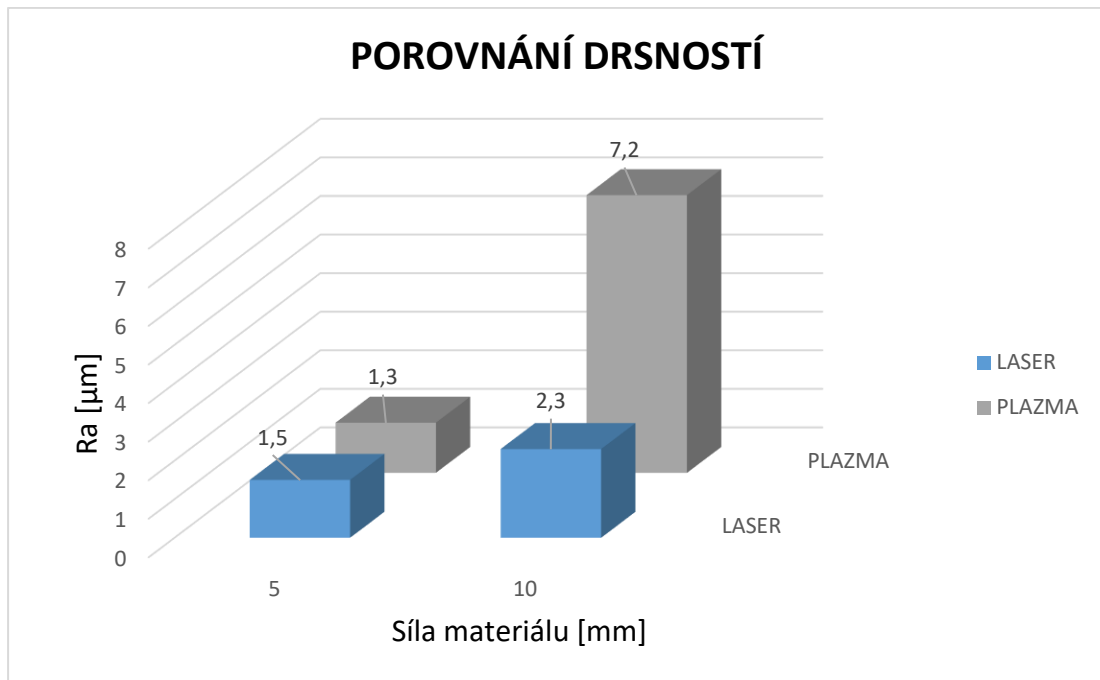


Obr. 27. Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 11 373 tloušťka 5 mm, obrábění CO<sub>2</sub> laserem

## 10.4 Porovnání jakostí řezu obrobeneho povrchu vzorků řezaných na CO<sub>2</sub> laseru a plazmě



Obr. 28. Porovnání fotografií naskenovaných povrchů řezů materiálu 11 373 tloušťky 5 mm



Obr. 29. Porovnání drsností řezů laser x plazma

## 10.5 Zhodnocení

Z modelu i grafu je zřejmé, že obě technologie jsou si velmi podobné z hlediska jakosti řezu. Ačkoliv bylo pro vyrobení vzorků vzhledem k odlišným technologiím použito různých řezných parametrů, a to především řezné rychlosti, můžeme konstatovat, že pro tenké plechy daného materiálu jsou vhodné obě technologie, pokud nejsou dány jiné požadavky. Kvalita řezu se mění výrazněji až při tloušťce 10 mm. Pokud bychom se zaměřili na základní charakteristiky drsnosti povrchu - střední aritmetickou úchylku Ra a největší výšku nerovnosti profilu Rz, je patrné, že obě tyto hodnoty jsou pro tloušťku materiálu 5 mm téměř shodné, zatímco u tloušťky materiálu 10 mm obráběného plazmou dochází již u obou sledovaných parametrů téměř k trojnásobnému nárůstu jak hodnoty střední aritmetické úchylky Ra, tak také hodnot maximální výšky nerovnosti Rz.

Na základě vyhodnocených parametrů drsnosti povrchu je tedy možno pro dané technologie konstatovat, že pro obrábění větších tlouštěk materiálu by bylo vhodnější použít laserovou technologii a tím dosáhnout výrazně kvalitnější řezné hrany.

## 11 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ÚKOSU

U vzorků byl naměřen úkos pomocí posuvného měřítka, a to v kruhovém otvoru a na vnějším obrysu vzorku. Hodnoty byly měřeny v obou případech ve dvou rovinách. Při kruhovém otvoru byla vstupní rovina označena písmenem „B“ a výstupní rovina písmenem „D.“ U vnějšího obrysu to byly roviny A (vstupní) a C (výstupní). Následně byly naměřené hodnoty statisticky vyhodnoceny. Úkos (kuželovitost) jsme vypočetli rozdílem průměrných vstupních a výstupních hodnot.

**Pro zpracování výsledků bylo využito vzorců:**

- Aritmetický průměr:  $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
- Směrodatná odchylka:  $S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$
- Variační koeficient:  $V_x = \frac{s}{\bar{x}}$
- Úkos:  $Y = \bar{x}_{\text{vstupní}} - \bar{x}_{\text{výstupní}}$

## 11.1 Vyhodnocení výsledků úkosu kruhového otvoru, plazma

Tabulka 7 - Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru B, tl. 5 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 5 mm, rovina B						
Počet měření	Ø B [mm]	$\bar{x}$	$x - \bar{x}$ [mm]	$(x - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	30,26	30,34	-0,076	0,0058	0,0042	0,0001
2	30,43		0,094	0,0088		
3	30,34		0,004	0,0000		
4	30,27		-0,066	0,0044		
5	30,45		0,114	0,0129		
6	30,30		-0,036	0,0013		
7	30,28		-0,056	0,0032		
8	30,36		0,024	0,0006		

Tabulka 8 – Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru D, tl. 5 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 5 mm, průměr D						
Počet měření	Ø D [mm]	$\bar{x}$	$x - \bar{x}$ [mm]	$(x - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	29,93	29,96	-0,034	0,0011	0,0010	0,0000
2	29,91		-0,054	0,0029		
3	30,00		0,036	0,0013		
4	29,93		-0,034	0,0011		
5	30,01		0,046	0,0021		
6	29,94		-0,024	0,0006		
7	29,97		0,006	0,0000		
8	30,02		0,056	0,0032		

Úkos pro plazmu o tloušťce  $t = 5$  mm:

$$\bar{x}_B - \bar{x}_D = 0,38 \text{ mm}$$

Tabulka 9 - Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru B, tl. 10 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 10 mm, průměr B						
Počet měření	Ø B [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	30,26	30,34	-0,076	0,0058	0,0042	0,0001
2	30,43		0,094	0,0088		
3	30,34		0,004	0,0000		
4	30,27		-0,066	0,0044		
5	30,45		0,114	0,0129		
6	30,30		-0,036	0,0013		
7	30,28		-0,056	0,0032		
8	30,36		0,024	0,0006		

Tabulka 10 - Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru D, tl. 10 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 10 mm, průměr D						
Počet měření	Ø D [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	29,45	29,70	-0,254	0,0644	0,0263	0,0009
2	29,64		-0,064	0,0041		
3	29,59		-0,114	0,0129		
4	29,62		-0,084	0,0070		
5	29,66		-0,044	0,0019		
6	29,97		0,266	0,0709		
7	29,80		0,096	0,0093		
8	29,90		0,196	0,0385		

Úkos pro plazmu o tloušťce  $t = 10$  mm:

$$\bar{x}_B - \bar{x}_D = 0,64 \text{ mm}$$

Tabulka 11 - Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru B, tl. 15 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 15 mm, průměr B						
Počet měření	Ø B [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	30,18	30,59	-0,411	0,1691	0,0586	0,0019
2	30,63		0,039	0,0015		
3	30,89		0,299	0,0893		
4	30,49		-0,101	0,0103		
5	30,57		-0,021	0,0005		
6	30,88		0,289	0,0834		
7	30,57		-0,021	0,0005		
8	30,52		-0,071	0,0051		

Tabulka 12 - Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru D, tl. 15 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 15 mm, průměr D						
Počet měření	Ø D [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	30,45	29,80	0,651	0,4241	0,4090	0,0137
2	29,50		-0,299	0,0893		
3	29,62		-0,179	0,0320		
4	30,38		0,581	0,3379		
5	28,64		-1,159	1,3427		
6	30,42		0,621	0,3860		
7	29,90		0,101	0,0103		
8	29,48		-0,319	0,1016		

Úkos pro plazmu o tloušťce  $t = 15$  mm:

$$\bar{x}_B - \bar{x}_D = 0,79 \text{ mm}$$



## 11.2 Vyhodnocení výsledků úkosu kruhového otvoru, laser

Tabulka 13 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru B, tl. 5 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 5 mm, průměr B						
Počet měření	Ø B [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	Vx[%]
1	29,97	29,95	0,02	0,0004	0,0001	0,0000
2	29,96		0,01	0,0001		
3	29,94		-0,01	0,0001		
4	29,95		0,00	0,0000		
5	29,94		-0,01	0,0001		
6	29,94		-0,01	0,0001		
7	29,93		-0,02	0,0004		
8	29,95		0,00	0,0000		

Tabulka 14 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru D, tl. 5 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 5 mm, průměr D						
Počet měření	Ø D [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	Vx[%]
1	29,92	29,95	-0,030	0,0009	0,0003	0,0000
2	29,97		0,020	0,0004		
3	29,94		-0,010	0,0001		
4	29,97		0,020	0,0004		
5	29,95		0,000	0,0000		
6	29,96		0,010	0,0001		
7	29,95		0,000	0,0000		
8	29,94		-0,010	0,0001		

Úkos pro laser o tloušťce  $t = 5$  mm:

$$\bar{x}_B - \bar{x}_D = 0 \text{ mm}$$

Tabulka 15 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru B, tl. 10 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 10 mm, průměr B						
Počet měření	Ø B [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	29,98	29,97	0,010	0,0001	0,0001	0,0000
2	29,97		0,000	0,0000		
3	29,98		0,010	0,0001		
4	29,96		-0,010	0,0001		
5	29,96		-0,010	0,0001		
6	29,99		0,020	0,0004		
7	29,97		0,000	0,0000		
8	29,97		0,000	0,0000		

Tabulka 16 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru D, tl. 10 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 10 mm, průměr D						
Počet měření	Ø D [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	29,95	29,93	0,020	0,0004	0,0005	0,0000
2	29,89		-0,040	0,0016		
3	29,90		-0,030	0,0009		
4	29,92		-0,010	0,0001		
5	29,93		0,000	0,0000		
6	29,93		0,000	0,0000		
7	29,94		0,010	0,0001		
8	29,95		0,020	0,0004		

Úkos pro laser o tloušťce  $t = 10$  mm:

$$\bar{x}_B - \bar{x}_D = 0,04 \text{ mm}$$

Tabulka 17 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru B, tl. 15 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 15 mm, průměr B						
Počet měření	Ø B [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	Vx[%]
1	29,99	29,99	0,000	0,0000	0,0002	0,0000
2	30,00		0,010	0,0001		
3	29,98		-0,010	0,0001		
4	29,99		0,000	0,0000		
5	30,00		0,010	0,0001		
6	29,97		-0,020	0,0004		
7	29,99		0,000	0,0000		
8	29,97		-0,020	0,0004		

Tabulka 18 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru D, tl. 15 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 15 mm, průměr D						
Počet měření	Ø D [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	Vx[%]
1	29,86	29,85	0,010	0,0001	0,0003	0,0000
2	29,82		-0,030	0,0009		
3	29,83		-0,020	0,0004		
4	29,86		0,010	0,0001		
5	29,84		-0,010	0,0001		
6	29,88		0,030	0,0009		
7	29,84		-0,010	0,0001		
8	29,85		0,000	0,0000		

Úkos pro laser o tloušťce  $t = 15$  mm:

$$\bar{x}_B - \bar{x}_D = 0,14 \text{ mm}$$

### 11.3 Vyhodnocení výsledků úkosu vnějšího obrysu, plazma

Tabulka 19 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině A, tl. 5 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 5 mm, rovina A						
Počet měření	A [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	148,92	148,93	-0,013	0,0002	0,0015	0,0000
2	148,94		0,007	0,0001		
3	149,00		0,067	0,0046		
4	148,98		0,047	0,0023		
5	148,95		0,017	0,0003		
6	148,88		-0,053	0,0028		
7	148,90		-0,032	0,0011		
8	148,89		-0,043	0,0018		

Tabulka 20 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině C, tl. 5 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 5 mm, rovina C						
Počet měření	C [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	149,41	149,46	-0,054	0,0029	0,0010	0,0000
2	149,43		-0,034	0,0011		
3	149,45		-0,014	0,0002		
4	149,48		0,016	0,0003		
5	149,48		0,016	0,0003		
6	149,44		-0,024	0,0006		
7	149,51		0,046	0,0021		
8	149,51		0,046	0,0021		

Úkos pro plazmu o tloušťce  $t = 5$  mm:

$$\bar{x}_C - \bar{x}_A = 0,53 \text{ mm}$$

Tabulka 21 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině A, tl. 10 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 10 mm, rovina A						
Počet měření	A [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	149,64	149,63	0,014	0,0002	0,0003	0,0000
2	149,65		0,024	0,0006		
3	149,62		-0,006	0,0000		
4	149,65		0,024	0,0006		
5	149,63		0,004	0,0000		
6	149,60		-0,026	0,0007		
7	149,62		-0,006	0,0000		
8	149,60		-0,026	0,0007		

Tabulka 22 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině C, tl. 10 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 10 mm, rovina C						
Počet měření	C [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	150,60	150,57	0,031	0,0010	0,0003	0,0000
2	150,55		-0,019	0,0004		
3	150,57		0,001	0,0000		
4	150,55		-0,019	0,0004		
5	150,57		0,001	0,0000		
6	150,56		-0,009	0,0001		
7	150,58		0,011	0,0001		
8	150,57		0,001	0,0000		

Úkos pro plazmu o tloušťce  $t = 10$  mm:

$$\bar{x}_C - \bar{x}_A = 0,94 \text{ mm}$$

Tabulka 23 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině A, tl. 15 mm

PLAZMA OCEL 11 373, tloušťka 15 mm, rovina A						
Počet měření	A [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	147,83	147,87	-0,035	0,0012	0,0006	0,0000
2	147,82		-0,045	0,0020		
3	147,89		0,025	0,0006		
4	147,90		0,035	0,0012		
5	147,91		0,045	0,0020		
6	147,85		-0,015	0,0002		
7	147,90		0,035	0,0012		
8	147,82		-0,045	0,0020		

Tabulka 24 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině C, tl. 15 mm

PLAZMA, OCEL 11 373, tloušťka 15 mm, rovina C						
Počet měření	C [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	149,00	149,01	-0,010	0,0001	0,0003	0,0000
2	149,01		0,000	0,0000		
3	149,02		0,010	0,0001		
4	149,00		-0,010	0,0001		
5	149,03		0,020	0,0004		
6	149,03		0,020	0,0004		
7	149,01		0,000	0,0000		
8	148,98		-0,030	0,0009		

Úkos pro plazmu o tloušťce  $t = 15$  mm:

$$\bar{x}_C - \bar{x}_A = 1,14 \text{ mm}$$

## 11.4 Vyhodnocení výsledků úkosu vnějšího obrysu, laser

Tabulka 25 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině A, tl. 5 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 5 mm, rovina A						
Počet měření	A [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	150,01	150,02	-0,01	0,0001	0,0001	0,0000
2	150,02		0,00	0,0000		
3	150,02		0,00	0,0000		
4	150,03		0,01	0,0001		
5	150,00		-0,02	0,0004		
6	150,01		-0,01	0,0001		
7	150,02		0,00	0,0000		
8	150,03		0,01	0,0001		

Tabulka 26 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině C, tl. 5 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 5 mm, rovina C						
Počet měření	C [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	150,02	150,02	0,000	0,0000	0,0001	0,0000
2	150,00		-0,020	0,0004		
3	150,01		-0,010	0,0001		
4	150,02		0,000	0,0000		
5	150,03		0,010	0,0001		
6	150,02		0,000	0,0000		
7	150,01		-0,010	0,0001		
8	150,03		0,010	0,0001		

Úkos pro laser o tloušťce  $t = 5$  mm:

$$\bar{x}_C - \bar{x}_A = 0 \text{ mm}$$

Tabulka 27 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině A, tl. 10 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 10 mm, rovina A						
Počet měření	A [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	150,00	150,02	-0,020	0,0004	0,0002	0,0000
2	150,01		-0,010	0,0001		
3	150,03		0,010	0,0001		
4	150,03		0,010	0,0001		
5	150,04		0,020	0,0004		
6	150,02		0,000	0,0000		
7	150,01		-0,010	0,0001		
8	150,04		0,020	0,0004		

Tabulka 28 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině C, tl. 10 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 10 mm, rovina C						
Počet měření	C [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V <sub>x</sub> [%]
1	150,12	150,10	0,020	0,0004	0,0002	0,0000
2	150,10		0,000	0,0000		
3	150,11		0,010	0,0001		
4	150,11		0,010	0,0001		
5	150,09		-0,010	0,0001		
6	150,08		-0,020	0,0004		
7	150,10		0,000	0,0000		
8	150,08		-0,020	0,0004		

Úkos pro laser o tloušťce  $t = 10$  mm:

$$\bar{x}_C - \bar{x}_A = 0,08 \text{ mm}$$



Tabulka 29 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině A, tl. 15 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 15 mm, rovina A						
Počet měření	A [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
1	149,99	150,01	-0,020	0,0004	0,0003	0,0000
2	150,02		0,010	0,0001		
3	150,00		-0,010	0,0001		
4	149,99		-0,020	0,0004		
5	150,01		0,000	0,0000		
6	150,02		0,010	0,0001		
7	150,03		0,020	0,0004		
8	150,04		0,030	0,0009		

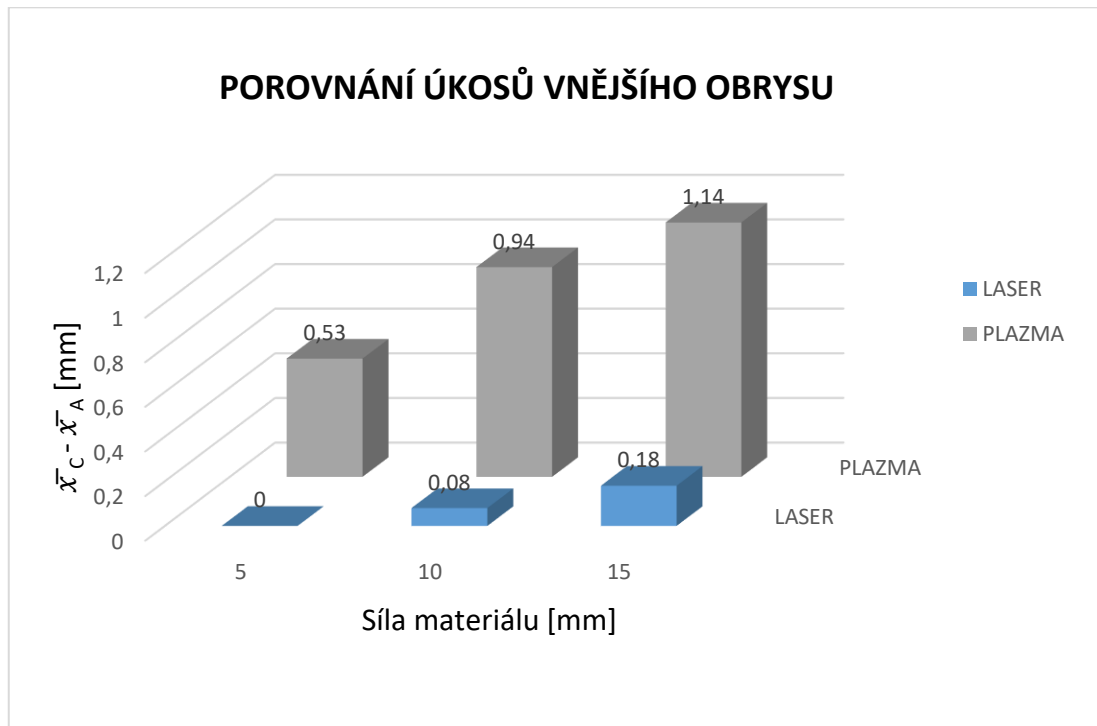
Tabulka 30 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině C, tl. 15 mm

LASER, OCEL 11 373, tloušťka 15 mm, rovina C						
Počet měření	C [mm]	$\bar{x}$	$x-\bar{x}$ [mm]	$(x-\bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
1	150,21	150,19	0,020	0,0004	0,0012	0,0000
2	150,19		0,000	0,0000		
3	150,20		0,010	0,0001		
4	150,20		0,010	0,0001		
5	150,13		-0,060	0,0036		
6	150,19		0,000	0,0000		
7	150,20		0,010	0,0001		
8	150,18		-0,010	0,0001		

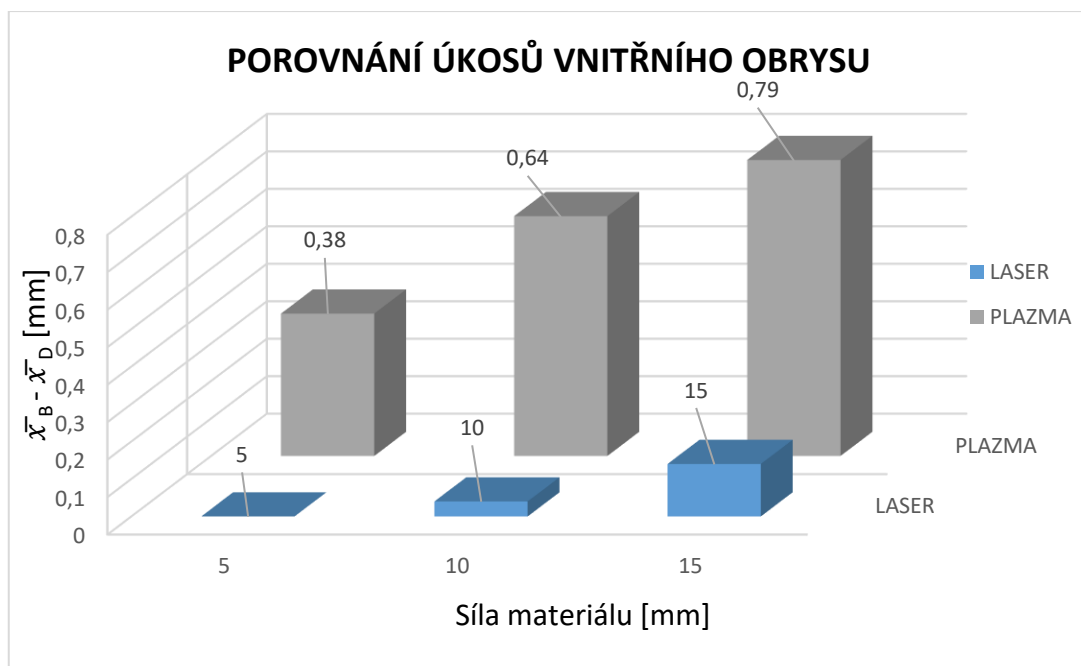
Úkos pro laser o tloušťce  $t = 15$  mm:

$$\bar{x}_C - \bar{x}_A = 0,18 \text{ mm}$$

### 11.5 Porovnání výsledků úkosů



Obr. 30. Porovnání úkosů řezů laser x plazma pro vnější obrys



Obr. 31 Porovnání úkosů řezů laser x plazma pro vnitřní obrys

## 11.6 Zhodnocení

Jak z grafu, tak i z naměřených hodnot úkosu je zřejmé, že materiály řezané plazmou mají výrazně větší úkos řezu než materiály řezané laserem, a to platí pro všechny tři tloušťky materiálu bez ohledu na to, zda řežeme vnější nebo vnitřní obrys. Také můžeme vidět, že u obou technologií se zvětšuje sklon společně s tloušťkou materiálu.

Pokud bychom se zaměřili na porovnání sklonu řezných hran, zde je patrný rozdíl mezi řezáním vnitřních řezných hran otvoru, kdy naměřené hodnoty průměrů jsou větší na vstupu paprsku a menší na výstupu, tzn. že rozměr se směrem ke spodní hraně zmenšuje.

U naměřených hodnot vnějších rozměrů, tedy u obvodových hran, je tento trend opačný.

## ZÁVĚR

Zpracovaná bakalářská práce spadá svou náplní do oblasti nekonvenčních technologií, konkrétně zde byla řešena otázka kvality obrábění kovových materiálů různých tloušťek za pomoci dvou odlišných technologií, a to laserového obrábění a obrábění paprskem plazmy.

Teoretická část práce byla rozdělena do šesti kapitol, ve kterých byly postupně vysvětleny pojmy „Nekonvenční technologie“ a základní odlišnosti od klasických technologií, jejich přednosti a hlavní oblasti využití. Následuje rozdělení nekonvenčních technologií podle převládajícího účinku úběru materiálu na jednotlivé oblasti a jejich stručná charakteristika. Závěr teoretické části byl věnován podrobnější charakteristice dvou vybraných technologií spadajících do oblasti tepelných principů úběru materiálu, a to jmenovitě technologii laserového obrábění a technologii řezání plazmou.

Cílem praktické části bakalářské práce bylo srovnání laserové a plazmové technologie, především z hlediska získané kvality řezných hran. Za tímto účelem proběhlo experimentální obrábění vzorků z oceli třídy 11 373 na CO<sub>2</sub> laseru „Trulaser 3030“ a plazmovém stroji „Cybertronic“.

Na každém zařízení byly vyrobeny vzorky o tloušťce 5 mm, 10 mm a 15 mm, na kterých dále proběhlo vyhodnocení kvality povrchu řezných hran a úkosu vnitřních i vnějších řezných hran v laboratořích UVI.

Z hlediska porovnání možností obou technologií v získané kvalitě řezu je na základě vyhodnocení měření zřejmé, že pro tenké materiály do tloušťky cca 5 mm jsou výsledné hodnoty jednotlivých charakteristik drsnosti povrchu srovnatelné. Ačkoliv bylo pro výrobu vzorků vzhledem k odlišným technologiím použito různých řezných parametrů - především řezné rychlosti, můžeme konstatovat, že pro tenké plechy daného materiálu jsou tedy vhodné obě technologie. Kvalita řezu se mění výrazněji až při tloušťce 10 mm. Pokud bychom se zaměřili na základní charakteristiky drsnosti povrchu - střední aritmetickou úchylku Ra a největší výšku nerovnosti profilu Rz, je patrné, že obě tyto hodnoty jsou pro tloušťku materiálu 5 mm téměř shodné, zatímco u tloušťky materiálu 10 mm řezané plazmou dochází již u obou sledovaných parametrů téměř k trojnásobnému nárůstu jak hodnoty střední aritmetické úchylnky Ra, tak také hodnot maximální výšky nerovnosti Rz. Měření průměrných hodnot u materiálů větších tloušťek (převážně to již bývají dělicí řezy), by s ohledem na značný rozdíl hodnot drsnosti na vstupu a výstupu paprsku z materiálu bylo značně zkreslené.

Na základě vyhodnocených parametrů drsnosti povrchu je tedy možno pro dané technologie konstatovat, že pro obrábění větších tloušťek materiálu by bylo vhodnější použít laserovou technologii a tím dosáhnout výrazně kvalitnější řezné hrany.

Při vyhodnocení úkosu řezných hran (kuželovitosti), byly porovnávány naměřené hodnoty ze vzorků o tloušťce 5 mm, 10 mm a 15 mm. Porovnáním naměřených hodnot se ukázalo, že u obou technologií úkos řezných hran roste se zvětšující se tloušťkou materiálu.

Z naměřených hodnot je zřejmé, že materiály řezané plazmou mají výrazně větší úkos řezu než materiály řezané laserem, a to platí pro všechny tři tloušťky materiálu bez ohledu, zdali řežeme vnější nebo vnitřní obrys.

Topografie povrchu u obou technologií je málo prozkoumanou oblastí a jako všechny vysokoenergetické paprsky zanechávají i tyto technologie viditelné rýhování na obrobené ploše, které je výsledkem cyklické povahy paprsku při interakci s materiálem v důsledku oscilace proudění taveniny (rychlost posuvu, tlak přídavného plynu) a také postupnou ztrátou energie při průniku paprsku do materiálu. Dochází k vychýlení paprsku, které je úměrně k řezané tloušťce materiálu, a které výrazně ovlivňuje jak rozměrovou přesnost, úkos řezné hrany a v neposlední řadě kvalitu dokončeného povrchu.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] BARCAL, Jaroslav, 1989. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: ČVUT.
- [2] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS, 2014. *Výrobní inženýrství a technologie*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [3] DILLINGER, Josef a A KOL., 2007. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles cz. s.r. o.
- [4] HÁBOVČÍK, Peter, 1989. *Lasery a fotodetektory*. Bratislava: Alfa.
- [5] HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK, 2001. *Strojírenská technologie 2: Koroze základy obrábění výrobní postupy 2. díl. 2. vydání*. Praha: Scientia, spol.
- [6] HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH, 2007. *Delenie kovových materiáov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. Ostrava: Poruba. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [7] HORÁK, Milan a Pavel ENGST, 1989. *Aplikace laserů*. Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury.
- [8] KOČMAN, Karel, 2011. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství cerm.
- [9] LAPŠANSKÁ, Hana, 2010. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc. ISBN 978-808-7240-656.
- [10] Laserové řezání jako bezkontaktní proces oddělování, ©2020. *Trumpf* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/pouziti/laserove-rezani/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/)
- [11] MAŇKOVÁ, Ildikó, 2000. *Progressívne technológie*. Košice: Viena.
- [12] MORÁVEK, Rudolf, 1999. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita.
- [13] NOVÁK, Ing. Miroslav, 2014. LASERY - ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. *Lasery a optika* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>

- [14] Plazmové technologie, *Elektronická učebnice* [online]. [cit. 2020-03-25].  
Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1419>
- [15] Průchozí laserové svařování [online]. [cit. 2019-12-03]. Dostupné z:  
[http://www.denz-bio-medical.com/webshop/images/product\\_images/original\\_images/laser-welding.jpg](http://www.denz-bio-medical.com/webshop/images/product_images/original_images/laser-welding.jpg)
- [16] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL, 2001. *Strojírenská technologie 3: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění 2. díl*. Praha: Scientia, spol. s. r. o., pedagogické nakladatelství.
- [17] SOCHOR, Václav, 1990. *Lasery a koherentní svazky*. Praha: Academia. ISBN 80-200-354-1.
- [18] SADÍLEK, Marek, 2009. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB - Technická universita Ostrava. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [19] TURŇA, Milan, 1989. *Špeciálne metódy zvarania*. Bratislava: Alfa.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
E <sub>1</sub>	Nižší energetická hladina
E <sub>2</sub>	Vyšší energetická hladina
A	Vstupní rovina vnějšího obrysu
B	Vstupní rovina kruhového otvoru
C	Výstupní rovina vnějšího otvoru
D	Výstupní rovina kruhového otvoru
h	Planckova konstanta = 6,626.10 <sup>-34</sup> [J.s]
v	Frekvence uvolněného vlnění
Y	Úkos



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Schéma ultrazvukového obrábění [12]</i> .....	14
<i>Obr. 2. Schéma obrábění paprskem vody [14]</i> .....	15
<i>Obr. 3. Schéma elektrochemického obrábění [14]</i> .....	16
<i>Obr. 4. Schéma elektroerozivního obrábění [16]</i> .....	19
<i>Obr. 5. Schéma obrábění paprskem elektronů [16]</i> .....	20
<i>Obr. 6. Schéma plazmového hořáku [14]</i> .....	23
<i>Obr. 7. Druhy plazmových hořáků [16]</i> .....	24
<i>Obr. 8. Stroj pro CNC řezání plazmou [14]</i> .....	25
<i>Obr. 9. Schéma laseru [12]</i> .....	26
<i>Obr. 10. Schéma laserového obrábění [10]</i> .....	27
<i>Obr. 11. CO<sub>2</sub>Laser [12]</i> .....	30
<i>Obr. 12. Stroj pro řezání laserem [10]</i> .....	33
<i>Obr. 13. Výkres vzorku</i> .....	36
<i>Obr. 14. Směry vyhodnocení drsnosti povrchu [8]</i> .....	37
<i>Obr. 15. Použitý laserový stroj</i> .....	40
<i>Obr. 16. Použitá řezací hlava</i> .....	40
<i>Obr. 17. Použitý plazmový stroj</i> .....	41
<i>Obr. 18. Řez materiálu 11373 tloušťka 5 mm, obrábění plazmou</i> .....	44
<i>Obr. 19. Řez materiálu 11 373 tloušťka 10 mm, obrábění plazmou</i> .....	45
<i>Obr. 20. Řez materiálu 11 373 tloušťka 5 mm, obrábění CO<sub>2</sub> laserem</i> .....	46
<i>Obr. 21. Řez materiálu 11 373 tloušťka 10 mm, obrábění CO<sub>2</sub> laserem</i> .....	47
<i>Obr. 22. Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 373, tloušťka 5 mm, obrábění plazmou</i> .....	48
<i>Obr. 23. Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 373 tloušťka 5 mm s odfiltrovanou vlnitostí, obrábění plazmou</i> .....	49
<i>Obr. 24. Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 11 373 tloušťka 5 mm, obrábění plazmou</i> .....	49
<i>Obr. 25. Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 373 tloušťka 5 mm obrábění CO<sub>2</sub> laserem</i> .....	49
<i>Obr. 26. Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 373 tloušťka 5 mm s odfiltrovanou vlnitostí, obrábění CO<sub>2</sub> laserem</i> .....	50
<i>Obr. 27. Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 11 373 tloušťka 5 mm, obrábění CO<sub>2</sub> laserem</i> .....	50
<i>Obr. 28. Porovnání fotografií naskenovaných povrchů řezů materiálu 11 373 tloušťky 5 mm</i> .....	51
<i>Obr. 29. Porovnání drsností řezů laser x plazma</i> .....	52

---

<i>Obr. 30. Porovnání úkosů řezů laser x plazma pro vnější obrys .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 31 Porovnání úkosů řezů laser x plazma pro vnitřní obrys .....</i>	<i>66</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1 - Řezné podmínky pro řezání laserem.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 2 - Řezné podmínky pro řezání plazmou.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 3 - Hodnoty drsnosti pro obrábění plazmou, tl. 5 mm.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 4 - Hodnoty drsnosti pro obrábění plazmou, tl. 10 mm.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 5 - Hodnoty drsnosti pro obrábění CO<sub>2</sub> laserem, tl. 5 mm.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 6 - Hodnoty drsnosti pro obrábění CO<sub>2</sub> laserem, tl. 10 mm.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 7 - Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru B, tl. 5 mm.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 8 – Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru D, tl. 5 mm.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 9 - Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru B, tl. 10 mm.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 10 - Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru D, tl. 10 mm.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 11 - Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru B, tl. 15 mm.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 12 - Hodnoty úkosu pro plazmu v průměru D, tl. 15 mm.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 13 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru B, tl. 5 mm.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 14 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru D, tl. 5 mm.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 15 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru B, tl. 10 mm.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 16 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru D, tl. 10 mm.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 17 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru B, tl. 15 mm.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 18 - Hodnoty úkosu pro laser v průměru D, tl. 15 mm.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 19 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině A, tl. 5 mm.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 20 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině C, tl. 5 mm.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 21 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině A, tl. 10 mm.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 22 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině C, tl. 10 mm.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 23 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině A, tl. 15 mm.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 24 - Hodnoty úkosu pro plazmu v rovině C, tl. 15 mm.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 25 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině A, tl. 5 mm.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 26 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině C, tl. 5 mm.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 27 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině A, tl. 10 mm.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 28 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině C, tl. 10 mm.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 29 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině A, tl. 15 mm.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 30 - Hodnoty úkosu pro laser v rovině C, tl. 15 mm.....</i>	<i>65</i>