

Porovnání výsledků laserového obrábění na CO₂ laseru a vláknovém laseru

Bc. Radek Zaoral

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek Zaoral**

Osobní číslo: **T14324**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Porovnání výsledků laserového obrábění na CO2 laseru a vláknovém laseru**

Zásady pro vypracování:

1. **Vypracování literární studii na dané téma**
2. **Provedte experimentální obrábění vybraných materiálů při změně vstupních parametrů na CO2 laseru a na vláknovém laseru Fiber**
3. **Provedte vyhodnocení výsledků laserového obrábění a porovnejte tyto dvě technologie**
4. **Provedte statistické zpracování dat**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

dle doporučení vedoucí práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016

doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan




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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/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.

Ve Zlíně 6. 5. 2016



.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá porovnáním kvality obrobeného povrchu různých kovových materiálů získaných při řezání na CO₂ laseru a vláknovém laseru.

Literární studie shrnuje základní teoretické poznatky o nekonvenčních technologiích, jako je například elektroerozivní obrábění, obrábění plazmovým paprskem, elektronovým paprskem, iontovým paprskem aj. Hlavní důraz je kladen na laserovou technologii, základní vlastnosti laserového svazku, podstatu vzniku laserového záření, typy laserů, tepelné účinky záření na materiál a také na způsoby použití v praxi.

Experimentální část této práce je zaměřena na porovnání a vyhodnocení výsledné kvality řezu při změně technologických parametrů na vzorcích zhotovených na dvou principiálně odlišných typech laserů, konkrétně na CO₂ laseru a moderním vláknovém laseru FIBER. Dosažené výsledky pro různé druhy materiálů jsou zhodnoceny v závěru každé kapitoly.

Klíčová slova:

Laser, nekonvenční obrábění, laserové obrábění, vláknový laser, CO₂ laser, obrábění.

ABSTRACT

This thesis presents a comparison of the quality of the machined surface of various metallic materials obtained in cutting CO₂ lasers and fiber lasers.

Literary study summarizes the basic theoretical knowledge about unconventional technologies such as electrical discharge machining, machining plasma jet, electron-pa-sputter, ion beam and others. The main emphasis is on laser technology, the basic characteristics of the laser beam, the essence of formation of laser radiation, types of lasers, thermal effects of radiation on the material and also to methods for use in practice.

Experimental part of this work focuses on the comparison and evaluation of the quality of the final cut when changing process parameters on samples made for principal on two different types of lasers, namely CO₂ laser and fiber laser modern FIBRE. Results achieved for various materials are evaluated at the end of each chapter.

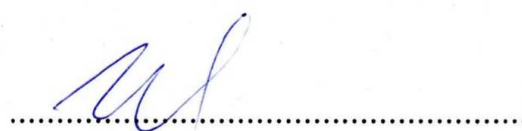
Keywords:

Laser, unconventional machining, laser cutting, fiber laser, CO₂ laser, machining.

Rád bych tímto poděkoval vedoucí mé diplomové práce paní doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za její předmětné připomínky, rady a ochotnou spolupráci. Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Vladimíru Patovi za ochotnou pomoc a připomínky k měření a vyhodnocení vzorků.

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

Ve Zlíně dne: 6. 5. 2016



OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	13
1.1 ODLIŠNOSTI NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ OD METOD OBRÁBĚNÍ TRÍSKOVÉHO	13
1.2 NEVÝHODY NĚKTERÝCH NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ	15
1.3 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ	16
1.3.1 Podle využívaných fyzikálních principů oddělování materiálu	16
1.3.2 Podle účasti nástroje jako geometrického tělesa	16
2 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE A JEJICH POPIS	17
2.1 ELEKTROCHEMICKÉ METODY OBRÁBĚNÍ	17
2.1.1 Využití elektrochemického obrábění	18
2.2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ	19
2.2.1 Využití elektroerozivního obrábění	20
2.3 OBRÁBĚNÍ PAPRSKEM ELEKTRONŮ	20
2.4 OBRÁBĚNÍ IONTOVÝM PAPRSKEM	21
2.5 OBRÁBĚNÍ ULTRAZVUKEM	22
2.6 OBRÁBĚNÍ KAPALINOVÝM PAPRSKEM	22
2.7 OBRÁBĚNÍ PLAZMOU	23
3 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ LASEREM	24
3.1 PRINCIP LASERU	24
3.1.1 Základní vlastnosti laserového svazku:	26
3.1.1.1 Výkon laseru	26
3.1.1.2 Účinnost laseru	26
3.2 PŮSOBNÍ LASEROVÉHO PAPRSKU NA MATERIÁL	27
3.3 ZÁKLADNÍ TYPY LASERŮ A JEJICH ROZDĚLENÍ	28
3.3.1 Pevnolátkové lasery	28
3.3.2 Plynové lasery	30
3.3.3 Kapalinové lasery	31
3.3.4 Polovodičové lasery	31
3.3.5 Chemické lasery	32
3.4 VLÁKNOVÝ LASER (FIBER LASER TECHNOLOGY)	32
3.4.1 Princip Vláknových laserů	32
3.4.2 Vznik laserového paprsku Vláknového laseru	33
3.4.3 Výhody vláknových laserů	34
3.5 CO ₂ LASER	35
3.5.1 Princip CO ₂ laseru	35
3.5.2 Vznik laserového paprsku u CO ₂ laseru	36
3.5.3 Vedení laserového paprsku	37
3.5.4 Ovlivnění životnosti rezonátoru a laseru	38
3.5.5 Zaostrovací vzdálenost laseru	39
3.5.6 Výhody a nevýhody CO ₂ laseru	39

3.6	VYUŽITÍ LASERŮ V PRAXI.....	39
3.6.1	Dělení materiálu laserem.....	40
3.6.2	Soustružení podporované laserem.....	40
3.6.3	Soustružení laserem	40
3.6.4	Vrtání laserem	41
3.7	DALŠÍ MOŽNOSTI APLIKACE LASERU	42
4	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	43
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	44
5	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ LASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ NA CO₂ A VLÁKNOVÉM LASERU.....	45
5.1	POPIS ZAŘÍZENÍ PRO OBRÁBĚNÍ CO ₂ LASEREM	45
5.2	POPIS ZAŘÍZENÍ PRO OBRÁBĚNÍ VLÁKNOVÝM LASEREM	47
5.3	UNIVERZÁLNÍ MIKROSKOP CARL ZEISS	48
5.4	TAYLOR HOBSON TALYSURF CLI 500	49
5.5	CHARAKTERISTIKY ŘEZANÝCH MATERIÁLŮ	50
5.5.1	Chemické složení a základní vlastnosti nerezové oceli 17 240	50
5.5.2	Chemické složení a základní vlastnosti konstrukční oceli 11 375.....	52
5.5.3	Chemické složení a základní vlastnosti ušlechtilé oceli Hardox 450.....	55
6	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ OBRÁBĚNÍ.....	58
6.1	VLÁKNOVÝ LASER.....	59
6.1.1	Řez materiálů na vláknovém laseru- řezné parametry dodané výrobce.....	59
6.1.2	Výsledky měření jakosti řezu vláknového laseru- optimalizované parametry.....	64
6.1.2.1	Tloušťka 6mm materiál 11 375.....	64
6.1.2.2	Tloušťka 8mm materiál 11 375.....	67
6.1.2.3	Tloušťka 6mm materiál Hardox 450.....	69
6.1.2.4	Tloušťka 8mm materiál Hardox 450.....	72
6.1.2.5	Tloušťka 6mm materiál 17 240.....	74
6.1.2.6	Tloušťka 8mm materiál 17 240.....	77
6.2	CO ₂ LASER	79
6.2.1	Řez materiálů na CO ₂ laseru- řezné parametry dodané výrobcem	79
6.2.2	Výsledky měření jakosti řezu materiálů na CO ₂ laseru - optimalizované parametry	85
6.2.2.1	Tloušťka 6mm materiál 11 375.....	85
6.2.2.2	Tloušťka 8mm materiál 11 375.....	88
6.2.2.3	Tloušťka 6mm materiál Hardox 450.....	90
6.2.2.4	Tloušťka 8mm materiál Hardox 450.....	93
6.2.2.5	Tloušťka 6mm materiál 17 240.....	95
6.2.2.6	Tloušťka 8mm materiál 17 240.....	98
6.2.3	Popis grafů	100
6.3	POROVNÁNÍ JAKOSTÍ ŘEZU OBROBENÉHO POVRCHU MATERIÁLŮ ŘEZANÝCH NA CO ₂ A VLÁKNOVÉM LASERU	101
6.3.1	Porovnání řezu CO ₂ a vláknového laseru- materiál 11 375	102
6.3.2	Porovnání řezu CO ₂ a vláknového laseru- materiál Hardox 450	104
6.3.3	Porovnání řezu CO ₂ a vláknového laseru- materiál 17240	106

ZÁVĚR	109
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	112
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	114
SEZNAM OBRÁZKŮ	115
SEZNAM TABULEK.....	120

ÚVOD

Nekonvenční metody obrábění jsou v dnešní době v průmyslu nepostradatelné. Pod nekonvenčními metodami si můžeme představit metody obrábění, kdy nedochází k úběru materiálu mechanickou prací ale tepelným, abrazivním nebo chemickým účinkem. Tyto metody si našly nezastupitelné místo v průmyslu, ale i v dalších odvětvích lidského snažení, jako například lékařství a dermatologie, kde je laserová technologie využívána jako chirurgický nástroj. V průmyslu se tyto technologie používají hlavně na dělení materiálu, tepelné zpracování kovů, soustružení, ale také v mnoha dalších technologických operacích.

Nekonvenční metody mají sice vyšší ekonomickou náročnost na provoz než běžné obrábění, ale rychlosti opracování jsou značně rychlejší. Největší výhodou těchto metod je obrábění materiálů, které by běžnými metodami třískového obrábění nebylo možné obrábět.

Rozšiřování nekonvenčních metod obrábění je také důsledkem vyvíjení nových materiálů, které jsou značně tvrdé, otěruvzdorné. Nekonvenční metody obrábění, které jsou založené na fyzikálním nebo chemickém úběru materiálů nám tyto materiály umožňují obrábět bez ohledu na jejich fyzikální vlastnosti.

Diplomová práce se zabývá využitím těchto moderních technologií v strojírenském průmyslu. Konkrétně je zde řešena problematika výsledků obrábění získaných při použití dvou odlišných laserových zařízení, běžně využívaného CO₂ laseru a moderního vláknového laseru.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Nekonvenčními metodami obrábění jsou myšleny takové způsoby obrábění, při kterých většinou není, na rozdíl od klasického, použita mechanická práce pro úběr materiálu. Jsou to technologie, kdy nedochází k úběru materiálu přímo dotykem mezi obrobkem a břitem nástroje. Obrábění u progresivních metod nespočívá jen na mechanickém působení nástroje na obrobek, při kterém vzniká tření a plastická deformace materiálu. Obrobek se přímo nestýká s nástrojem, který má definovanou nebo nedefinovanou geometrii. Je možné tedy obrábět velmi tvrdý materiál měkkým nástrojem. K úběru dochází oddělováním velmi malých částic materiálu působením chemických, elektrochemických, elektroerozivních, mechanických nebo tepelných procesů.[1]

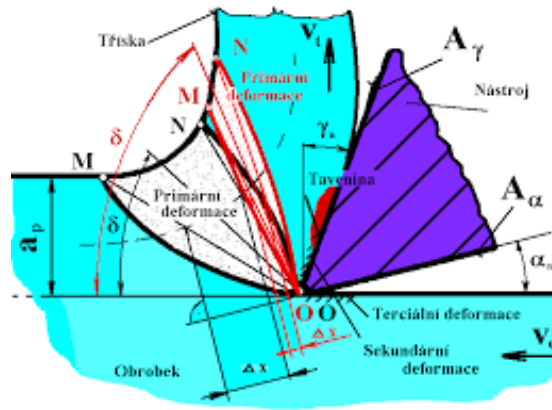
Nekonvenční technologie jsou v technické praxi nepostradatelné. Stále více jsou vyvíjeny nové materiály, které mají vysokou pevnost, tvrdost otěruvzdornost. Technologie, které jsou založeny na využití fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu, nám tyto materiály, těžce až nemožně obrobitelné běžnými technologiemi, umožňují obrábět. [2],[3]

1.1 Odlišnosti nekonvenčních metod obrábění od metod obrábění třískového

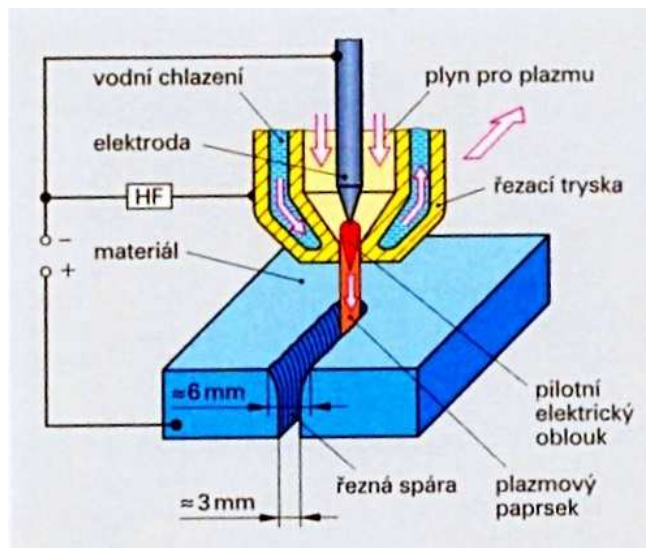
Základní odlišností nekonvenčních metod od třískového obrábění je ta, že se nástroj přímo nestýká s obrobkem a tím pádem v obrobené ploše nevzniká řezný odpor a obrobek není deformován mechanickým zatížením. Nástroj tedy nemusí být z tvrdšího materiálu než obrobek. Povrchy obrobků, které jsou opracovány třískovým obráběním (řezáním, broušením) vykazují jisté typické znaky, jako jsou povrchové napětí, zpevnění povrchové vrstvy, vznik trhlin a mikrone rovností. Tyto znaky mohou mít záporný vliv na požadované vlastnosti obrobených ploch povrchu obrobku.

Progresivní metody, jak jsou také nekonvenční metody obrábění nazývány, přináší řešení problému s obrobením tvrdých, běžnými technologiemi jen těžko až neobrobitelných materiálů jako jsou např. keramika či vláknové kompozity. Pro tyto materiály je opracování progresivními metodami nenahraditelné. Řezné podmínky nejsou u nekonvenčních technologiích závislé na mechanických vlastnostech materiálu, pojem obrobitelnost u těchto technologií ztrácí svůj význam - obr.1, obr. 2.

Výhodou nekonvenčních technologií je používání takových procesů, které umožňují ubírat materiál na molekulární a atomové úrovni. Dokáží vytvořit velmi malé otvory (10 - 100 μm), díry se zakřivenou osou a obrábět dutiny tvarů, které není možné běžnými technologiemi vyrobit (např. malý čtvercový otvor).



Obr. 1. Deformace vzniklé při třískovém obrábění [4]



Obr. 2 Dělení materiálu plazmovým hořákem [3]

Další odlišností je dosahování větších řezných výkonů a možnost plné mechanizace a automatizace zavedením CNC řídicích systémů. Díky tomu je možné aplikovat výrobní operaci do výrobní linky. S výrobou tvaru může u některých nekonvenčních metod současně docházet k řízené změně vlastností povrchové vrstvy, zejména zvýšení únavové pevnosti či zvýšení odolnosti proti korozi. [2], [3], [4]

1.2 Nevýhody některých nekonvenčních metod obrábění

Nekonvenční metody obrábění mají řadu výhod, kterými konkurují běžným metodám obrábění. Tak jako všechny technologie mají i progresivní metody obrábění několik nevýhod:

- Nízká produktivita práce, která je důsledkem malých objemových úběrů obráběného materiálu.
- Vyšší energetická náročnost oproti klasickým metodám obrábění.
- Poměrně vysoká pořizovací cena

Porovnání nekonvenčních metod obrábění z hlediska úběru materiálu a náročnosti na energii s třískovým obráběním je v následující tabulce. (tab. 1) [5]

Tab. 1 Porovnání nekonvenčních metod s třískovým obráběním [5]

Způsob Obrábění	Úběr materiálu ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Příkon stroje (kW)
Soustružení, frézování	Až 1500	5-50
Broušení	80-1500	5-150
Elektroerozivní obrábění	5-120	Až 15
Elektrochemické obrábění	30-1000	80-2000
Ultrazvukové obrábění	3-30	1-5
Obrábění plazmou	1500	50-150
Obrábění laserem	30-500	5-40
Obrábění vodním paprskem	80-600	5-20
Obrábění elektronovým paprskem	3	5

1.3 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Nekonvenční metody lze dělit podle několika kritérií. Tyto kritéria se můžou v literatuře lišit, ale nejčastěji se lze setkat s následujícími rozděleními.

1.3.1 Podle využívaných fyzikálních principů oddělování materiálu.

Dělí nejprůhledněji jednotlivé nekonvenční metody a řadí je do skupin podle fyzikální podstaty ubírání materiálu dané technologie.

- Elektrotepelné principy – jsou to elektroerozivní obrábění, obrábění paprsky koncentrované energie (obrábění paprskem laseru, elektronovým paprskem, iontovým paprskem nebo paprskem plazmy).
- Elektrochemické principy – obrábění pomocí elektrolýzy.
- Chemické principy – obrábění leptáním (jedná se o odebrání několika setin milimetru materiálu. Většinou se touto technologií leští povrchy).
- Mechanické, abrazivní principy – obrábění ultrazvukem, kapalinovým paprskem, obrábění proudem brusiva. [5]

1.3.2 Podle účasti nástroje jako geometrického tělesa.

I když nástroj při obrábění nepřichází do přímého kontaktu s obrobkem, může dojít k jeho opotřebení. V těchto případech je nástroj negativem vyráběné dutiny či otvoru. Nástroj, který se opotřebovává je využíván v následujících progresivních metodách obrábění:

- Elektroerozivní obrábění.
- Elektrochemické obrábění.
- Obrábění ultrazvukem. [4]

2 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE A JEJICH POPIS

Je udáváno, že ve vyspělých státech zastávají 40 – 60 % technologických operací při výrobě náradí elektrické metody. Mezi nejrozšířenější z elektrických metod patří obrábění elektroerozivní. Touto metodou lze vyrábět tvarové dutiny nebo hloubit otvory. Dále je využívána u drátového řezání materiálu. Z elektrochemických obrábění nejvíce využívané elektrochemické broušení a hloubení. V posledních letech se v průmyslu také stále více používají lasery pro dělení, opracování a zušlechťování materiálů.

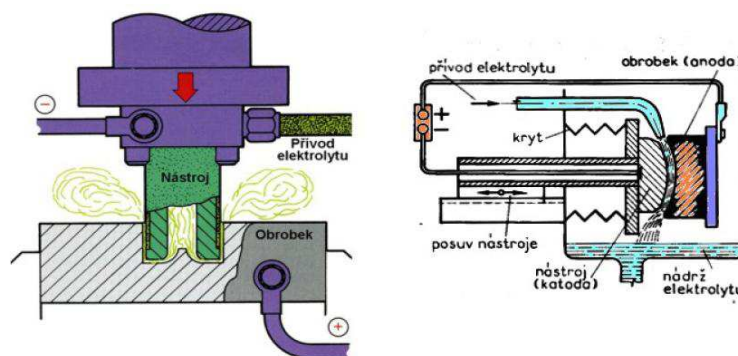
V oblasti dělení materiálu se také používají metody řezání plazmou a vysokoenergetickým paprskem kapaliny obohacené volnými částicemi (brusivem).

Následující kapitola se zabývá nastíněním principů těchto základních metod progresivních technologií. [5] [4]

2.1 Elektrochemické metody obrábění

Tyto metody obrábění využívají elektrochemického jevu, zvaného řízená elektrolýza. Je to relativní posuv elektrod, mezi kterými je malá mezielektrodová vzdálenost (0,05 – 2 mm), velký tlak a rychlost proudícího elektrolytu, vysoká proudová hustota při relativně malém napětí (5 – 20 V). [5]

Obrobek zapojen do obvodu stejnosměrného proudu má kladný pól (anoda) a obráběcí nástroj je napojen na záporný pól, tvoří anodu daného elektrického obvodu. Mezi nástrojem a obrobkem musí být udržována mezielektrodová mezera, která umožňuje proudění elektrolytu mezi anodou a katodou (elektrolytem bývá většinou vodný roztok NaCl nebo NaNO₃). V pracovním prostoru probíhají elektrochemické reakce, jejichž důsledkem dochází k rozpouštění anody a vytváří se tak negativ tvaru nástroje v obráběném materiálu. [5]



Obr. 3 Elektrochemické obrábění [6]

2.1.1 Využití elektrochemického obrábění

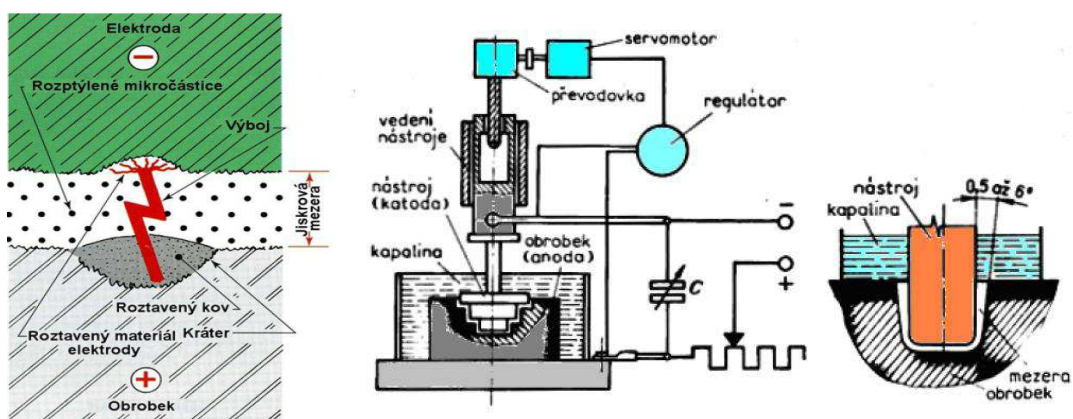
- Elektrochemické soustružení
 - obrobek je upnut na otáčejícím se vřetenu, které je spojeno s kladným pólem zdroje stejnosměrného pólu, nástroj je statický a je připojen na záporný pól. Tímto druhem obrábění lze vyrábět rotační součásti, zápichy nebo kruhové otvory do materiálů jinak obtížně obrobitelných.
- Elektrochemické hloubení otvorů
 - je popsáno výše, nástroj tvoří přímo negativ výsledného tvaru.
- Elektrochemické broušení
 - jedná se o kombinaci abrazivního úběru diamantovým brusivem a rozpouštění materiálu elektrolýzou, při čemž elektrolýza má podstatný vliv (až 90 % úběru). Používá se pro broušení polotovarů nebo ostření nástrojů ze slinutých karbidů.
- Elektrochemické odstraňování ořepů
 - je založeno na principu anodického rozpouštění nástroj odpovídá výslednému obrobku. Soustředění elektrolýzy pouze na ořepy lze zajistit izolací na katodě. Při tom je rozpouštění na hranách intenzivnější než na ploše.
- Elektrochemické honování
 - podobné elektrochemickému broušení, jenom s tím rozdílem, že materiál obrábí honovací kameny místo diamantového brusného kotouče.
- Elektrochemické leštění
 - k leštění dochází selektivním rozpouštěním vyvýšenin, podstatou je zajištění takových podmínek při elektrolýze, aby se mohla vytvořit na povrchu obrobku viskózní vrstvička, která je tvořena zplodinami. Tato vrstva se usazuje do prohlubní a klade odpor přechodu iontů, zatím co obnažené výstupky rozpouští elektrolýza.

- Elektrochemické značení
 - pro povrchové značení stačí úběr materiálu pouze několik tisícín. Ubraná vrstva se odlišuje jinou barvou než okolí a je mírně zapuštěná. [5]

2.2 Elektroerozivní obrábění

Elektroerozivní obrábění je nejrozšířenější metodou progresivního obrábění. K úběru materiálu je využíván elektrický výboj. Elektrický výboj nastává mezi dvěma elektrodami ponořenými do kapalného média s vysokým odporem. Kapalné médium tvoří kolem elektrod dielektrikum a elektrický oblouk mezi elektrodami je podmíněn napětím, které závisí na vzájemné vzdálenosti elektrod, vodivost dielektrika, znečištění dielektrika. [5],[2]

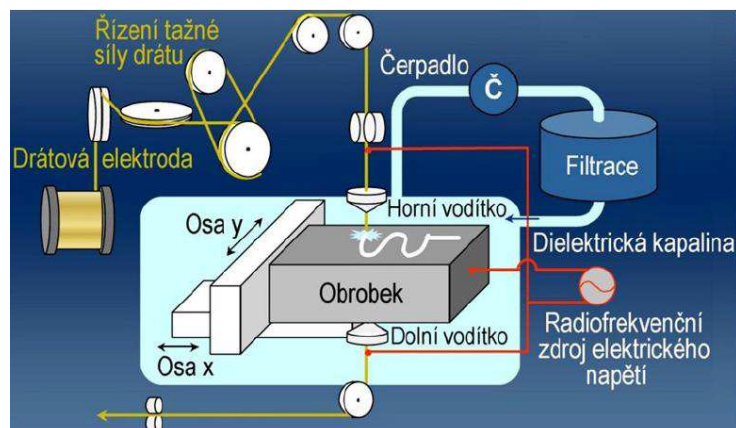
Přivedením napětí na elektrody vznikne mezi elektrodami elektrické napěťové pole. Toto způsobí pohyb volných kladných a záporných iontů, které zrychlují a nabývají velikých rychlostí. Při určité rychlosti se vytvoří tzv. ionizovaný vodivý kanál, díky kterému může mezi elektrodami procházet elektrický proud (vznik výboje), který vyvolává stále další srážky částic, vznikne plazmové pásmo s teplotami 3 000 - 12 000 °C. Při takových teplotách dochází k odpařování materiálu z elektrod. Odpařováním vzniká plynová bublina s vysokým tlakem. V okamžiku, kdy je přerušen elektrický proud, vzniká v bublině imploze, do uzavřeného prostoru vniká dielektrikum a velkými dynamickými silami vyplachuje roztavený materiál z kráteru. Na jedné z elektrod je eroze mnohonásobně vyšší (obrobek). [5], [2]



Obr. 4 Elektroerozivní obrábění [6]

2.2.1 Využití elektroerozivního obrábění

- Hloubení dutin a vyjiskřování ulomených nástrojů:
 - je založeno na postupném zapouštění elektrody do obrobku. Vzniklá dutina má tvar nástrojové elektrody. Vyjiskřování slouží pro opravu znehodnocených výrobků poškozením obráběcího nástroje (např. zalomený závitník). Vyjiskří se jádro nástroje a zbytky závitníku se pak z díry odstraní mechanicky.
- Elektroerozivní drátové řezání:
 - je využíváno zejména při výrobě lisovacích, střížných strojů, lisovacích nástrojů a šablon většinou pro dělení tenkých plechů. Mezi elektrodou a obrobkem vzniká vlivem elektroeroze mezera. Výsledný tvar výrobku je dán naprogramovaným posuvem obrobku v rovině x, y.



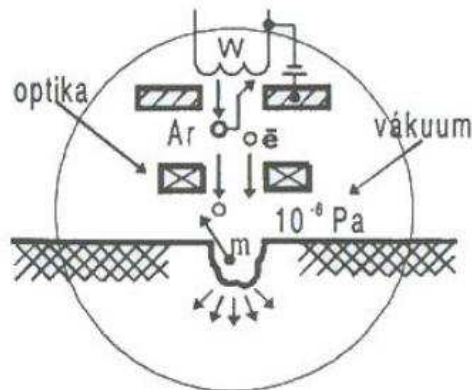
Obr. 5 Elektroerozivní drátové řezání [6]

- Elektroerozivní mikroděrování:
 - uplatňuje se v jemné mechanice, pro výrobu velmi malých otvorů 0,02-5 mm. [2], [5]

2.3 Obrábění paprskem elektronů

Obrábění elektronovým paprskem je využíváno především v leteckém a kosmickém průmyslu. Zařízení tvoří elektronové dělo, které zaostřuje a urychluje volné elektrony na

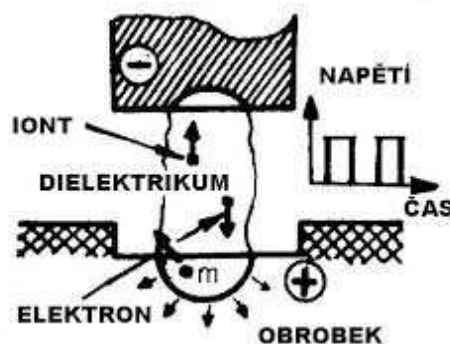
rychlost blízkou rychlosti světla. Svazek dopadá velkou rychlostí na obráběný materiál, v místě dopadu elektronů se přemění kinetická energie elektronů na energii tepelnou. Takto vzniklé teplo roztaví materiál, který se začne odpařovat. [2], [4]



Obr. 6 Obrábění svazkem elektronů [4]

2.4 Obrábění iontovým paprskem

Obrábění iontovým paprskem je založeno na narážení iontů do opracovávaného materiálu ve vakuu. Velikost ubíraného materiálu závisí na hustotě proudu iontů. Jako zdroj proudu iontů bývá používán argon, který ionizuje elektrony vyzářenými z katody. Kinetická energie iontů se nepřeměňuje na tepelnou energii, jako je tomu u obrábění svazkem elektronů, ale působí na povrch obrobku. Kinetická energie iontů je větší než energie vazeb molekul a atomů, což je příčinou jejich vytlačení. Touto metodou lze obrábět skoro všechny materiály, včetně optického skla nebo diamantu. [2], [5]

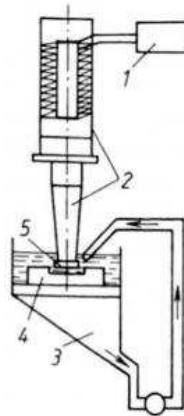


Obr. 7 Obrábění iontovým paprskem [4]

2.5 Obrábění ultrazvukem

Podstatou obrábění ultrazvukem je využití ultrazvukové energie (mechanicko-akustické) energie, která působí na dané prostředí kmity. Tyto kmity se ve sledovaném prostředí šíří a mohou vyvolávat fyzikální a chemické změny. Ultrazvukové kmity vyvolávají v materiálu napětí nebo různé namáhání, které vyvolává sekundární účinky projevující se formou kavitace, tepla deformací nebo mechanickými a elektrochemickými účinky. Nejčastěji se používá ultrazvukové obrábění s abrazivní příměsí. [2]

Nástroj kmitající vlivem ultrazvukové energie zatlačuje volné brusivo rozptýlené v kapalině do materiálu, z něhož jsou odlamovány drobné částičky a tím dochází k opracování povrchu obrobku. Kapalinou, v němž je rozptýleno brusivo bývá z pravidla voda. Účinnost obrábění zvyšuje také statický regulovatelný tlak nástroje. Vytvořený otvor má tvar čela nástroje. [2]

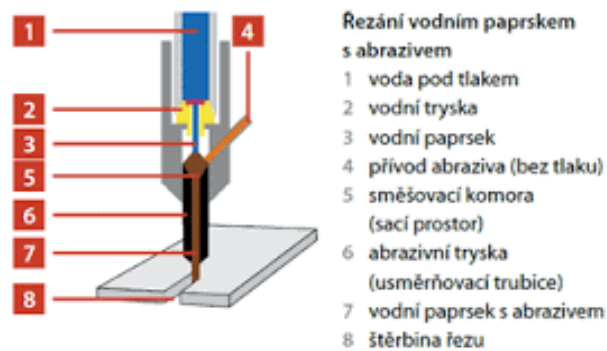


1 – generátor ultrazvukových kmitů, 2 – systém pro vytvoření mechanických kmitů, 3 – přívod brousících zrn a kapaliny, 4 – obrobek, 5 – nástroj

Obr. 8 Obrábění ultrazvukem [3]

2.6 Obrábění kapalinovým paprskem

Technologie využívá abrazivního účinku vysokoenergetického vodního paprsku. Vodní paprsek se převážně používá pro dělení většinou nekovových materiálů. Voda stlačená na pracovní tlak (40 – 400 Mpa) je smíchána s abrazivní a přes trysku je daným tlakem vysokou rychlostí vytlačována na povrch obráběného materiálu. Abrazivním materiálem jsou křemičitý písek, korundová nebo SiC zrna. Výstupní tryska musí odolávat vysokým abrazivním účinkům, proto je vyráběna z karbidu wolframu, keramických materiálů na bázi korundu nebo z kubického nitridu boru. [1],[2]



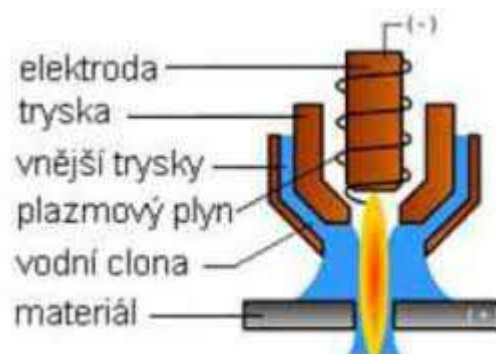
Obr. 9 Obrábění vodním paprskem s abrazivem

2.7 Obrábění plazmou

Plazma je stav plynů, které se ionizací stávají vodivé. Teplota zcela zionizované plazmy se pohybuje okolo 100 000 °C. Plazma vzniká buď ohřevem látky na velmi vysokou teplotu, nebo elektrickým výbojem mezi dvěma elektrodami.

Technologie obrábění plazmou využívá tavení materiálu v elektrickém oblouku, který hoří mezi netavící se katodou (nástrojem) a tavící se anodou (řezaným obrobkem). Dochází k rozložení molekul plynu, při kterém dochází k vysokému vývinu tepla. Z hořáku vychází paprsek plazmy, ten je zionizován a tím je dobře vodivý pro elektrický proud. Roztavený materiál je pak kinetickou energií proudu plazmy vytlačován z místa řezu. Pro plazmové plyny přivádějící se přímo do oblouku, kde ionizují, jsou využívány Ar, Ar+H₂, He, N₂.

Obrábění plazmou se používá hlavně pro dělení materiálů. [1],[5]



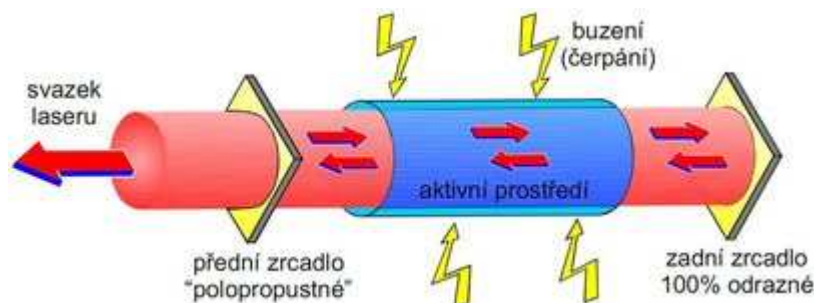
Obr. 10 Obrábění plazmou [7]

3 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ LASEREM

Laser byl vyvinut v roce 1960 fyzikem Theodore H. Maimanem. Jako první byl vyroben rubínový laser, tvořila ho rubínová tyčinka s vysokou přesností vybroušenými a vyleštěnými koncovými plochami. Tyto plochy tvořily soustavu rovinných dokonale rovnoběžných zrcadlových ploch. Jedna plocha byla postříbřena silnou vrstvou stříbra a na druhou bylo nanášeno stříbra méně, aby touto polopropustnou vrstvou mohl laserový paprsek odcházet. Laser vznikne výbojem xenonové výbojky, která je uložena okolo rubínového krystalu. Lasery jsou v dnešní době nezastupitelné. Hlavní využití nalézá laserová technologie v průmyslu, medicíně, vědě a výzkumu, elektronice, zábavním průmyslu jakožto i ve zcela „běžných“ věcech jako jsou laserová ukazovátka nebo počítačové CD-ROM. [8]

3.1 Princip laseru

Laser je monochromatické, uspořádané světlo, které má malou divergenci. Je založena na principu zesílení vybuze emise záření. Zesílením je vytvořen úzký svazek fotonů, na rozdíl od běžného světelného záření, které se pohybuje všemi směry.



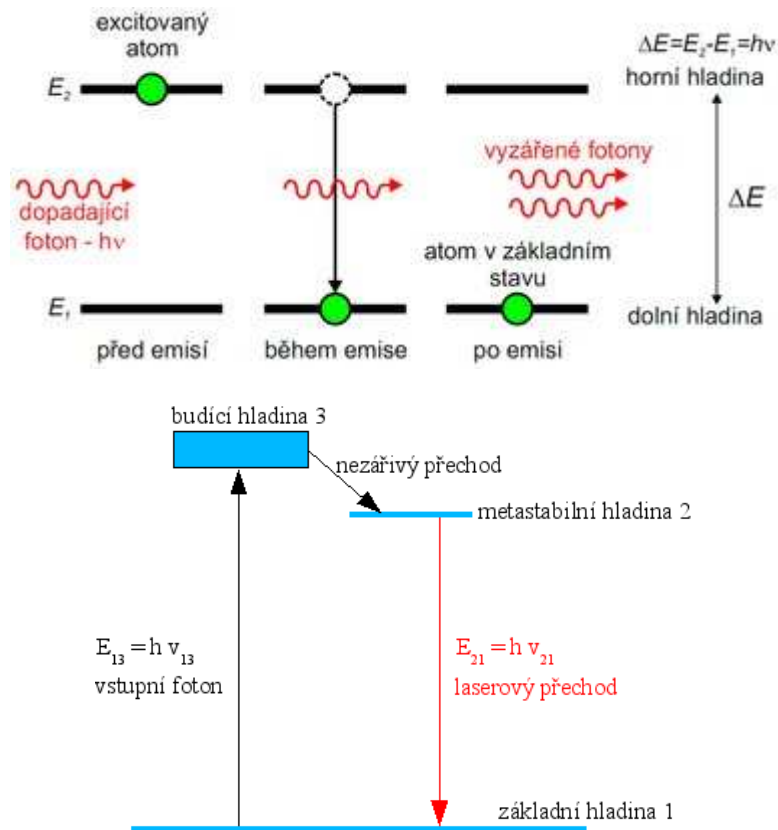
Obr. 11 Princip laseru [8]

Vznik laserového světla je možný v určitém prostředí stimulující elektromagnetické záření, při potlačení spontánní emise na úkor vnitřní energie záření. Spontánní samovolná emise vzniká, když vybuze atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energetickou hladinou E_1 a při tomto ději emitují kvantum světelného záření s frekvencí f , které je určena rovnicí:

$$E = h \cdot f = E_2 - E_1,$$

kde:

h – Planckova konstanta ($h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$). [1]

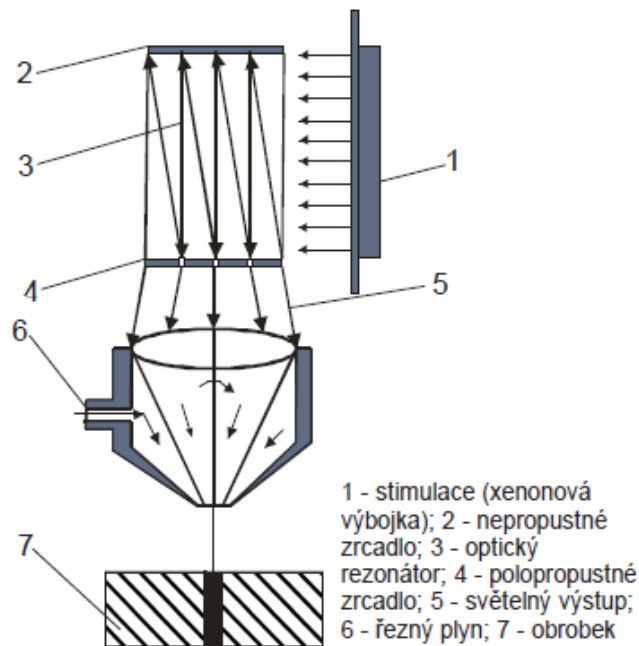


Obr. 12 Princip stimulované emise [4]

Budící světlo s energií fotonu E vyvolá přechod ze základní hladiny E_1 na vyšší E_3 . Foton s energetickou hodnotou na hladině E_3 má krátkou životnost, proto začne probíhat spontánní přechod zpět na E_1 nebo nucený nezářivý přechod na metastabilní hladinu E_m . Na této hladině má foton životnost řádově vyšší než na E_3 . Pokud bude působit dostatečně výkonné budící záření, začne populace na E_m narůstat až do stavu, kdy nastane inverzní populace mezi E_1 a E_2 . Při dalším průchodu fotonu s energií E , je vynucena další emise fotonů se stejnou frekvencí, díky tomu dojde k zesílení záření. Pro udržení fotonů v aktivním prostředí a získání tak dostatečného množství energie slouží optický rezonátor. Skládá se ze dvou zrcadel, z nichž jedno je nepropustné a druhé polopropustné. Osy těchto zrcadel musí být rovnoběžné. Před dosažením určité intenzity energie rezonují fotony od nepropustného zrcadla k propustnému. Při dosažení potřebné intenzity projde silný světelný paprsek přes polopropustné zrcadlo. Po průchodu polopropustným zrcadlem je paprsek vedený k čočce, která tento úzký paprsek soustředí na velmi malou plochu. V místě dopadu paprsku se mění světelná energie na energii tepelnou o hustotě řádově $10^8 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$. [4]

3.1.1 Základní vlastnosti laserového svazku:

- nepatrná divergence – tj. nerozbíhá se,
- monochromatický („jednobarevný“) – tj. generované fotony mají stejnou frekvenci, resp. vlnovou délku,
- koherentní – generované fotony jsou tzv. ve fázi časové i prostorové. [4]



Obr. 13 Optický rezonátor[4]

3.1.1.1 Výkon laseru

Množství energie vyzářené za určitý čas. Označuje se ve Watech. Čím kratší je doba trvání záblesku, tím větší je vyzářená energie. Např. pro značení (gravírování) se používá kontinuální paprsek CO₂ laseru o výkonu od 10 W do 100 W. [9]

3.1.1.2 Účinnost laseru

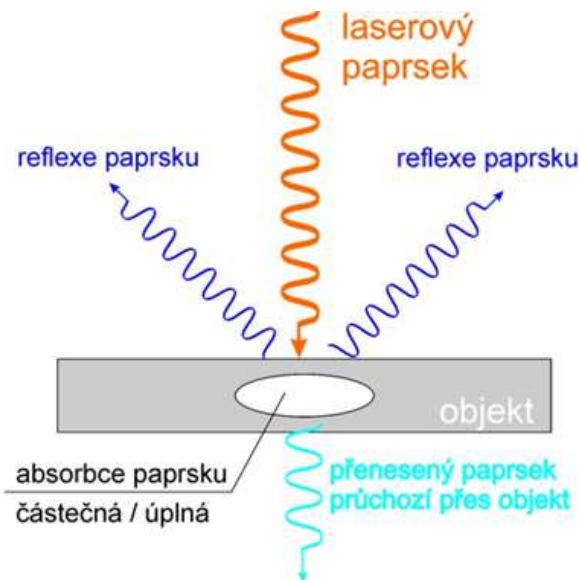
V porovnání s jinými typy laserů jako jsou například argon iontové lasery s účinností 0,1 %, jsou CO₂ lasery vysoce účinné a používají se pro kontinuální chod. Účinnost se pohybuje mezi 30 %. Ale pak jsou zde i jodové lasery s účinností okolo 80 %. Jde o poměr množství energie dodané a získané z laseru. Jen pro srovnání účinnost motoru u auta se pohybuje okolo 20 %. [9]

Vyšší účinnosti vykazují vláknové lasery, které díky polovodičovým diodám převádí velmi velkou část svého příkonu na výkon laserového paprsku. Paprsek u tohoto typu laseru vzniká a je veden v optickém vlákne. Účinnost se dosahuje okolo 25 %. [9]

3.2 Působení laserového paprsku na materiál

Při působení laseru na materiál dochází mezi materiálem a svazkem fotonů k různým interakcím. Tyto interakce jsou závislé na druhu obráběného materiálu. Při obrábění materiálu laserem závisí kvalita opracování na vlastnostech, které udávají schopnost materiálu být opracován laserem. Důležitými faktory, které ovlivňují opracování materiálu, jsou reflektivita materiálu (schopnost odrážet paprsky), absorpce (schopnost pohlcovat paprsky), tepelná vodivost materiálu, odpařování a natavování povrchové vrstvy. [1],[4]

Při kontaktu laserového svazku s materiálem je část paprsků odtržena z důvodu reflektivity materiálu, část paprsků pohlcena a část materiálem projde. Z hlediska opracování materiálu je důležité, aby materiál co nejvíce paprsků absorboval a co nejméně odrážel. Vlivem absorpce se přeměňuje světelná energie ze zfokusovaného laserové svazku na energii tepelnou. Vytvořené teplo natavuje povrch materiálu a ten se začne odpařovat. Vlivem odpařovaného materiálu dochází ke zvýšení tlaku, který vznikne v natavené vrstvě obrobku. Tlak vzniklý odpařováním potom odvádí taveninu z místa dopadu laserového paprsku a vzniká otvor, kterým může vnikat paprsek hlouběji do materiálu. Pro podporu a zrychlení pronikání paprsku hlouběji do materiálu se např. u laserového řezání při vrtání (propalu) materiálu fouká do místa působení přídavný plyn pod určitým tlakem, aby byla tavenina rychleji odváděna z místa tavení a nebránila tak natavení další vrstvy materiálu. Odstraňování materiálu nazývaná ablace je kombinace fotochemického a fototermického procesu. Při dopadu záření dochází jednak k porušení chemických vazeb absorpcí kvant energie a jednak porušením vazeb termicky – zvýšením teploty. [1],[4]



Obr. 14 Interakce materiálu a paprsku [9]

3.3 Základní typy laserů a jejich rozdělení

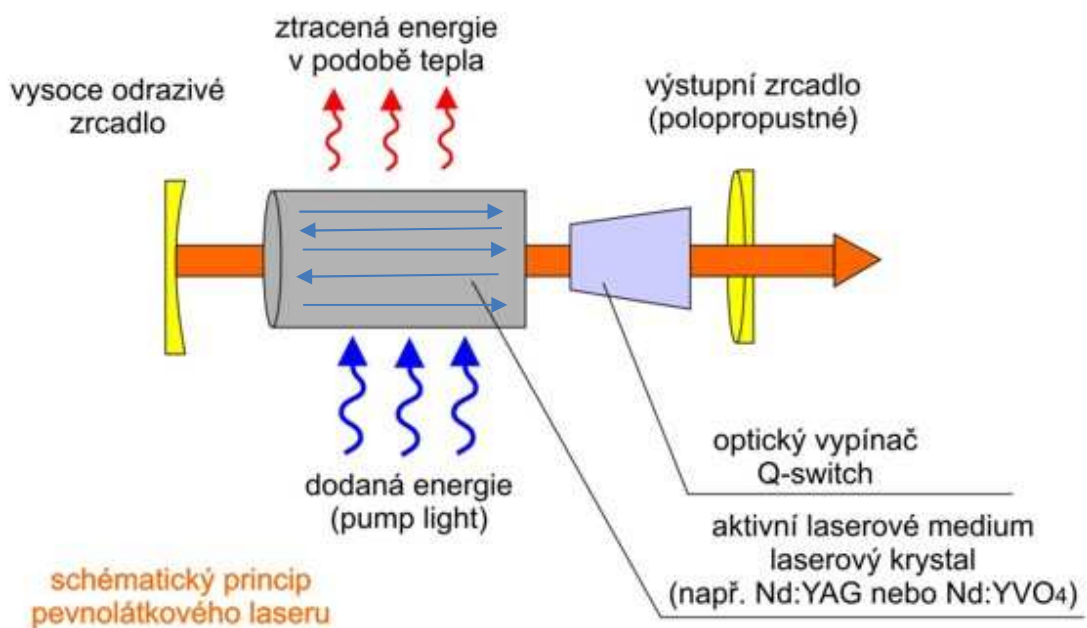
Z důvodu mnoha druhů laserů, které se v dnešní době používají, je nutné lasery nějak dělit. Lasery se dělí z několika hledisek. Jedním hlediskem, dle kterého se dají lasery rozdělit je podle skupenství materiálu, které se používá pro vznik materiálu.

- Pevnolátkové lasery.
- Plynové lasery.
- Kapalinové lasery.
- Polovodičové lasery.
- Plazmatické lasery.
- Chemické lasery. [4]

3.3.1 Pevnolátkové lasery

První pevnolátkový emitor laserového záření byl pevnolátkový laser využívající pevného prostředí rubínového krystalu. Lasery pevnolátkové mají atomy prvku, který způsobuje vznik laserového záření rozmístěny v pevné krystalické mřížce. Nejrozšířenějším z pevnolátkových laserů je Nd-YAG laser, kde aktivní prostředí tvoří matrice umělého YAG krystalu (*ytrium aluminium granát*), dopovaného ionty neodymu (Nd) nebo yterbia (Yb). Největší výhodou těchto laserů je možnost vést záření s vlnovou délkou asi 1 μm optickým vláknem. Tento přenos usnadňuje vedení paprsku od rezonátoru (místa vzniku paprsku) do místa působení paprsku na materiál (procesu obrábění). Čerpání krystalu je

prováděno buď kryptonovou výbojkou (lampou – stará technologie, která je na ústupu a v dnešní době se téměř nepoužívá), nebo nověji polem polovodičových diod. Hlavní nevýhodou laserů, které využívají kryptonovou výbojku je krátká životnost výbojky a malá účinnost, protože se nemalá část energie přemění na teplo. Z tohoto důvodu je nutné použít chlazení vodou. ND-YAG lasery se používají hlavně pro laserové svařování s požadavkem hlubokého provaření a poměrně malé teplotně ovlivněné zóny. Dále se používají s výhodou vysoké energie pulzu pro vrtání ušlechtilých ocelí a slitin. [7],[8]

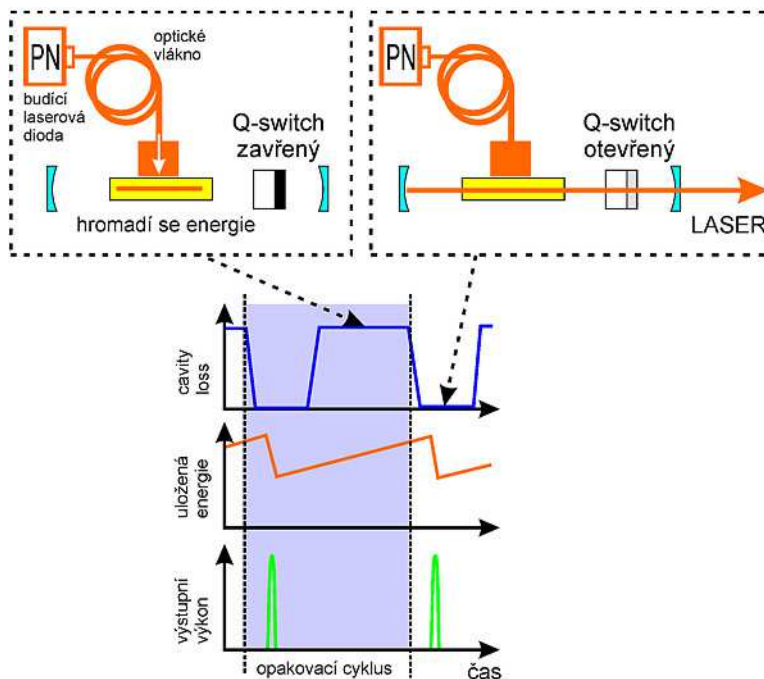


Obr. 15. Princip pevnolátkového laseru s kryptonovou výbojkou [9]

- Zvýšení pulzního výkonu Nd:YAG laseru

Pro zvýšení pulzního výkonu laseru je přidávána do rezonančního obvodu součástka nazývaná jako "Quality switch". Tento článek v rezonančním obvodu dokáže převést kontinuální mód na pulzní s vysokou energií. Při tomto ovládní laserového zdroje dochází k navýšení výkonu jednoho pulzu nad hodnotu, která je daná excitačním výkonem. Q-switch produkuje extrémně vysoké pulzy výkonu řádově až stovky kW, ale v časové délce několika nanosekund, nebo taky výkony GW (giga Watt) v časové délce pikosekund. Frekvence spínání je řádově ve stovkách kHz. Aktivní lze ovládat elektricky, pasivní mění své vlastnosti v závislosti na výkonu laseru. Princip je založen na clonění průchodu fotonů. Při aktivaci Q-switch dojde k zaclonění odchodu fotonů z rezonátoru, zároveň se zruší rezonanční obvod a v oblasti aktivujících se elektronů dochází k aktivaci mnohem více elektronů, vyzářující fotony. Vyzářením více fotonů se získá více kumulované energie.

Po deaktivaci Q-switch se rezonanční obvod otevře, v krystalu je ale mnohem více excitovaných elektronů a je vyzářeno větší množství fotonů. Dochází ke zvýšení laserové energie, která je rozdělena do jednotlivých pulzů s velkou energií. [9]



Obr. 16. Princip zvýšení výkonu součástkou Q-switch [9]

3.3.2 Plynové lasery

Mezi plynové lasery patří lasery excimerové. Jsou to plynové lasery s krátkou vlnovou délkou a vytváří světelné záření v ultrafialové oblasti a částečně i v oblasti měkkého rentgenového záření. Elektrickým vybuzením, produkuje pseudomolekulu-dimer, který emituje světlo ultrafialového rozsahu. Obsahuje reaktivní plyny (chlor, fluór) a směsi s netečnými plyny (argon, xenon, krypton). Tyto lasery pracují v pulzním režimu, patří do kategorie laserů s ultrakrátkým trváním impulzu udávaným v piko-sekundách.[4]

Z laserů, které používají k emitaci fotonů plyny je nejpoužívanější laser na bázi molekuly CO₂. Ostatní plynové lasery nemají dostatečný výkon, kromě argonového laseru a excimerových laserů. [1]

Využití plynových laserů s výkony do 1,5 kW, jsou gravírování a řezání nekovů (plasty, kůže, papír, skla, apod.), u CO₂ laseru s výkony do 3 kW lze řezat běžné oceli do tloušťky 20 mm a nerezové oceli do tloušťky 12 mm. Další průmyslovou aplikací je řezání a svařování kovů (výkony až do 20 kW), kde jsou CO₂ lasery zavedeny ve velkém množství.[7]

3.3.3 Kapalinové lasery

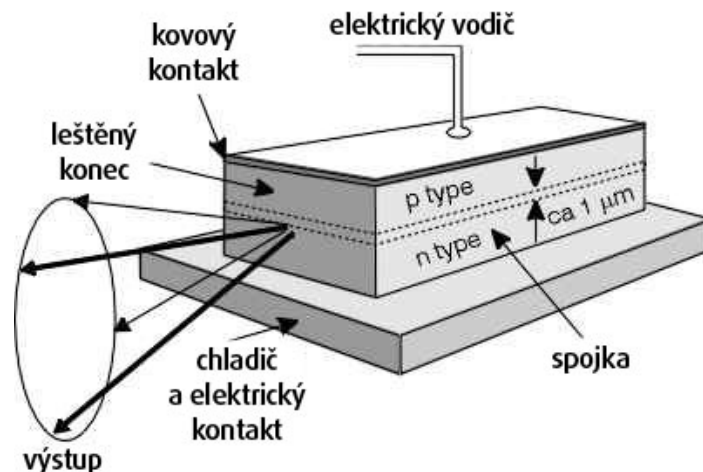
Aktivní prostředí u kapalinových laserů jsou opticky buzené roztoky organických barviv (rhodamin6G, kumarin). Pro buzení barvivových laserů se užívá optického záření. Použití barvivových laserů je především ve spektroskopii a informační technice. [4]

3.3.4 Polovodičové lasery

Aktivním prostředím je elektricky čerpaná polovodičová dioda. Diodové lasery se pohybují od výkonu mW až do kW. Tyto lasery mají vysokou účinnost, ale trpí nízkou kvalitou výstupního svazku. Mohou být miniaturních rozměrů (nízké výkony) a používají se v CD/DVD přehrávačích, laserových tiskárnách apod. Diodové lasery s vysokým výkonem se v průmyslu používají zejména na svařování (kovů i plastů) a kalení.[8]

Výhodou je, že pro generaci koherentního záření stačí rezonátor o rozměrech několika desetin milimetrů. U polovodičových laserů je možnost plynulého přeladění frekvence záření v poměrně široké spektrální oblasti. [10]

Jako aktivní látka je krystal obsahující přechod PN. Krystal je opracován do tvaru hranolu tak, aby jeho čelní stěny byly kolmé na tento přechod, čímž se vytvoří Fabry-Perotův rezonátor. Aktivní prostředí je čerpáno elektrickým proudem. Z PN přechodu o ploše řádově 10^{-6} mm² je emitováno záření ve viditelné červené, které se šíří v rovině přechodu a opakovanými odrazy se zesiluje. Jeho výkon dosahuje pouze několika miliwattů. Vlnová délka diodových laserů je dána koncentrací legujících prvků v polovodiči. Aktivní prostředí polovodičových laserů se budí převodem elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Vlastnosti těchto pásů se upravují dopováním polovodičů vhodnými příměsemi. K buzení se nejčastěji využívá injektování proudu přes přechod PN polovodiče. Může se však použít i optické buzení. [7]



Obr. 17. polovodičový laser [10]

3.3.5 Chemické lasery

Chemické lasery jsou schopny dodávat velké množství energie v krátkém časovém intervalu. Paprsky laseru jsou emitovány chemickou reakcí. Uplatňují se hlavně v armádě pro vojenské účely.

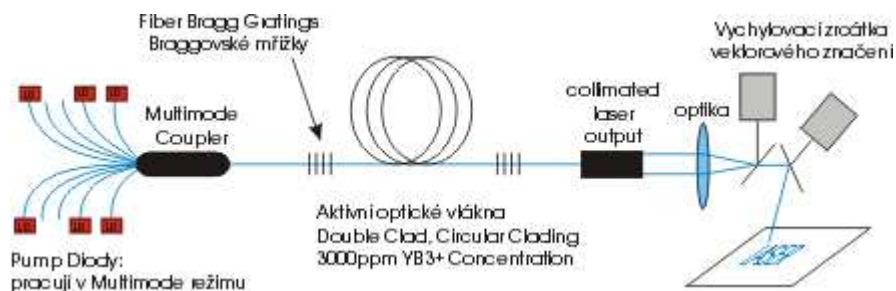
3.4 Vlákňový laser (Fiber laser technology)

V historii byl laser s optickými vlákny vynalezen u samého počátku vývoje laserů, kdy v roce 1963 Elias Snitzer popsal technologii cladding pumped laser. Namířením budícího paprsku do optického vlákna a právě využití technologie cladding funkce (skládání paprsků) umožnilo vznik vlákňového laseru. Metodu cladding funkce objevil ve společnosti IRE Polus v Moskvě Valentin Gaponstev a Igor Samartsev. Pro komerční uvedení na trh, musela ale technologie Fibre laser projít dvěma desetiletími vývoje. První komerčně nabízený a vyráběný vlákňový laser byl v roce 1980 a měl výkon v řádech miliwattů. Velkým skokem z miliwattových laserů do wattové třídy laserů byla v roce 1990 představena technologie 4 W laseru-Erbium-doped fiber laser. Pak v roce 1996 v průmyslové kvalitě použitý 10 wattová třída laserů, představená IPG Photonics. Přejít do 100 W třídy laserů následoval v roce 2000 společností IPG. V dnešní době jsou vlákňovými lasery nahrazovány klasické lasery YAG, pro svou účinnost a kvalitu paprsku laseru. Výkony dnešních vlákňových laserů se pohybují v desítkách kilo wattů.[9]

3.4.1 Princip Vlákňových laserů

Aktivní prostředí vlákňového laseru je tvořeno křemíkovým vlákem. Vlákno má průměr jen několik mikrometrů, ale délka vláken je několik metrů. Křemíkové vlákno je dopované

ionty prvků ze skupiny lanthanoidů (někdy nazývané také jako prvky vzácných zemin) jako Er (1 540 nm až 1 620 nm), Yb (1 060 nm až 1 120 nm) nebo Tm (1 720 nm až 2 000 nm), které se během výroby vlákna přimísí do jádra ve formě malých částic. Hlavní absorpční čáry těchto dopantů spadají do emisních pásů laserových diod, proto je čerpání laserovými diodami vysoce účinné. Střední vlákna laseru mohou mít různý průřez, který udává specifikaci laserového paprsku i jeho využití. Většinou jsou to průřezy tvaru obdélníku nebo čtverce. Optické vlákno plní svou funkcí úlohu krystalu u pevnolátkových laserů. Ve vláknu dochází ke vzniku a zároveň k zesílení paprsku. [9],[10]



Obr. 18. Princip vláknového laseru [9]

3.4.2 Vznik laserového paprsku Vláknového laseru

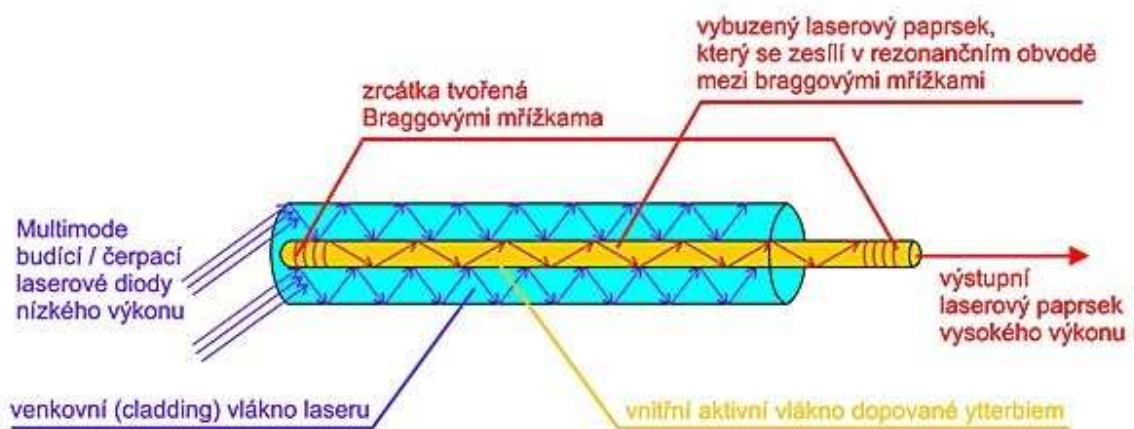
Ke vzniku paprsku dochází v rezonátoru, který tvoří Braggovy mřížky na koncích vlákna nebo vnější dichroická zrcadla. Princip spočívá v single-mode diode pumping (velkoplošné MM-multi mode čerpací diody), které emitují výkon (malým optickým vláknem) na stranu optického multi mode vlákna (složeného vlákna s větším průměrem) a vytváří budící světlo, které je absorbováno v ytterbium atomech v single mode optického vlákna - tzv. aktivní optické vlákno). [9]



Obr. 19. Optické vlákno [9]

Budící optické diody mají jinou vlnovou délku (budící vlnová délka) než je výsledný paprsek laseru, který vznikne v aktivním vlákně. Více diod dokáže vytvářet v optickém vlákně vysokou energii s vysokou kvalitou paprsku. Je zde ještě jeden velmi důležitý princip pro získání laserového paprsku a tou je vysoce výkonný optický zesilovač. Optický

zesilovač konvertuje malý světelný signál z budících diod do výkonného paprsku, často tisíckrát silnější, ale identický jako originál. Zvětšení výkonu se dosáhne použitím také více laserových diod. Teplo generované v optickém vlákne je odváděno velkou plochou vlákna a není potřeba aktivní chlazení. Protože aktivní vlákno může jen podpořit přenos laseru, kvalita paprsku není závislá na pracovním výkonu laseru. Z čerpacích diod vychází rozbíhavý svazek, který je fokusován na vysoce odrazovou vrstvu obalu vlákna. Průchodem vlákna je paprsek částečně absorbován, což zajišťuje buzení aktivního prostředí. Některé typy vláknových laserů mají záření z čerpacích diod vázáno do vlákna, které je vedeno souběžně s aktivním vláknem. Pokud je vlákno takto navázáno na čerpací diody, odpadá napojení pomocí trnu. Největší výhodou tohoto navázání paprsku do vlákna je možnost umístění více čerpacích vláken a prodloužení rezonátoru. Výsledkem je pak zvýšení účinnosti čerpání a možnosti dosažení vyšších výkonů. Maximální výkon jednoho vlákna se pohybuje okolo 200 W (kombinací vláken se pak dosahuje vyšších výkonů, např. laser o výkonu 1 kW poskytne 10 vláken). Současné nejvýkonnější vláknové lasery jsou ytterbiové, jejichž výkon dosahuje řádově několika desítek kilowatt. [9],[10]



Obr. 20. Princip rezonátoru vláknového laseru [9]

3.4.3 Výhody vláknových laserů

- Vedení laserového svazku z rezonátoru optickým vlákem, odpadá nutnost použití citlivých optických prvků.
- Možnost fokusace paprsku na velmi malý průměr.
- Vysoká kvalita laserového svazku.
- Výkon lze zvyšovat kombinací více vláken.

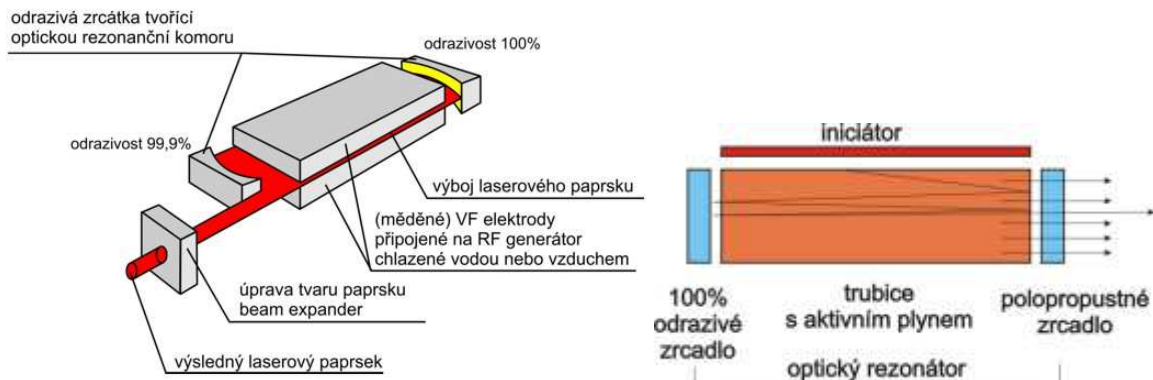
- Teplota aktivní látky se rozloží po celé délce vláken, není nutné tedy vlákno chladit.
- Vysoká účinnost laseru (až 30 %).
- Není nutné provádět nastavení rezonátoru.
- Nízký příkon laseru a s tím související snížení provozních nákladů na obrábění.
- Vysoká životnost laseru až 150 000 hodin.
- Možnost využití laseru v pulzním nebo také v kontinuálním cyklu. [9]

3.5 CO₂ laser

CO₂ laser patří mezi jedny z nejstarších laserů. Byl vynalezen v roce 1964, v Bellových laboratořích a na jeho vývoji se podíleli C. Kumar N. Patel. CO₂ laser je plynový laser, který využívá pro vznik záření kvantovo-energetické přechody související s oscilací molekul CO₂ a dusíku (N₂). [4], [10]

3.5.1 Princip CO₂ laseru

Hlavní část CO₂ laseru je tvořena trubicí, která je naplněna směsí plynů oxidu uhličitého (CO₂), dusíku (N₂) a helia (He). Energie nutná pro excitaci je vytvořena mezi elektrodami a má formu tlejivého výboje. Generátor napětí vytvoří vysoké napětí a to je následně přivedeno na elektrody. Mezi těmito elektrodami dojde k elektrickému výboji a tím dojde k nabuzení plynu CO₂ a k přechodu na nestabilní hladinu, kde je vytvořena stimulovaná emise. Trubice je zakončena dvěma rovnoběžnými zrcadly, z nichž jedno je plně reflektivní (odrazové) a druhé je polopropustné. Trubice zakončená těmito zrcadly a jejich usazení v určité vzdálenosti vytváří laserový paprsek a nazývá se rezonátor. Stimulovaná emise je reflektována světelnými vlnami, které vytváří elektrický výboj mezi elektrodami tak dlouho, dokud nevznikne koherentní světelná vlna odcházející polopropustným zrcátkem. Z důvodu velkého množství vznikajícího tepla je nutné rezonátor chladit. Chlazení bývá nejčastěji řešeno vodu pomocí chladicího agregátu, který musí udržet teplotu v trubicí pod 400 °K. [4], [10]

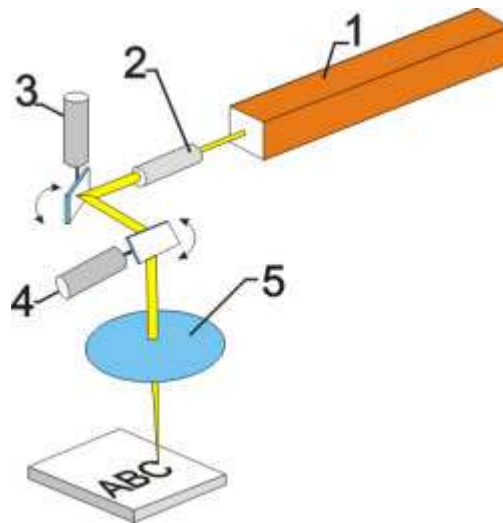
Obr. 21. Schéma rezonátoru CO₂ laseru [9]

3.5.2 Vznik laserového paprsku u CO₂ laseru

Při připojení vysokého napětí na elektrody vznikne mezi nimi (jak již bylo výše popsáno) elektrický oblouk, který vybudí molekuly oxidu uhličitého a dusíku. Mezi hladinami energie dojde k rezonančnímu přechodu a molekuly dusíku se vrací na základní úroveň. CO₂ může přecházet mezi jednotlivými úrovní energií a tak se emituje červené světlo s vlnovou délkou $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ nebo $9,6 \mu\text{m}$. Helium slouží v rezonátoru k depopulaci dolní energetické úrovně, protože srážkami s molekulami dochází k odvádění energie z nižších hladin ve formě tepla. Vybuzené atomy oxidu uhličitého potom emitují fotony, které při srážkách s atomy nebo molekulami vybudí další fotony k hromadné indukované emisi. Atomy padají na nižší energetickou hladinu, což má za následek emitaci fotonů, tedy vyzaření energie. Tyto fotony udržují zrcadla umístěná na koncích trubice uvnitř rezonátoru a při zpětném průchodu aktivním prostředím odražené fotony strhávají řadu dalších fotonů. Některé fotony se odrazí do jiného směru než je osa rezonátoru a tím opouští systém a zaniknou. Dojde tedy ke koherenci paprsku fotonů a polopropustným zrcadlem opouštějí systém v podobě minimálně se rozbíhajícího svazku, což je laserový paprsek. Tento princip je využíván u kontinuálních CO₂ laserů, kde je nutností, aby paprsek vystupoval stále stejnou intenzitou. [10],[4]

V průmyslu se často používají pulzní lasery s výstupní energií a krátkým pulsem. Toho je dosaženo širším pásmem pro rezonanční komoru a více frekvencí v pásmu. Jednotlivé frekvence musí být ve fázi s hlavní frekvencí. Následně dochází ke sčítání více frekvencí tak, že vzniká puls o vyšší energii a krátkém trvání. Kvalita pulsu lze vylepšit přidáním součástky nazývané Quality switch nebo taky Q-switch. Trubice s aktivním plynem CO₂ je o průměru asi 10 až 20 mm, její délka je okolo 0,5 až 1 m. Je možné taky použít dvě rovnoběžné trubice poloviční délky, na jednom konci spojené zrcadly pod úhlem 45°. Sníží

se tím konečná délka laserové trubice téměř na polovinu. Paprsek bývá většinou infračervený (10,6 μm ale i 9,3 μm nebo 10,2 μm apod.) a trvalý výkon je běžný do 200 W. Pro značení se používá nejčastěji 10 W nebo 30 W výkonu. CO₂ laser nemá velké nároky na čistotu plynu a příměsi plynů jako je xenon, helium a vodní pára jeho výkon ještě zvyšují. Největšími výrobci jsou Synrad a Coherent, laserové zdroje od těchto výrobců používá Solaris. Elektrická efektivita je 10 až 20 %, zbytek elektrické energie se přemění na teplo. Vychylovací systém je tvořen soustavou dvou zrcadel umístěných tak, aby docházelo k vychylování v obou osách (XY). Tomuto způsobu se říká PEN TYPE. Princip je podobný jako kreslení perem, na začátku cyklu přejíždí hlava na místo, kde má začít opracování materiálu s deaktivovaným laserovým paprskem. Před začátkem opracování se aktivuje laser a vykoná úkon obrábění, při přemístění do jiné polohy je laser opět deaktivován a zapne se až s dalším vektorově určeným pracovním úkonem, tedy plynule ve dvou osách díky vychylovacím zrcátkům pro každou osu. Za vychylovací soustavou zrcátek je optika, která soustřeďuje laserový paprsek do ohniska. Volbou typu optiky mění velikost značeného povrchu a také i vlastnosti značení. [10]



Obr. 22. Vychylování paprsku PEN TYPE. 1- laserový zdroj, 2- beam expander, optika rozšiřující paprsek, 3 a 4 - galvo motory pro X a Y osu se zrcátky směřující paprsek na 5 - výstupní optiku laseru [10]

3.5.3 Vedení laserového paprsku

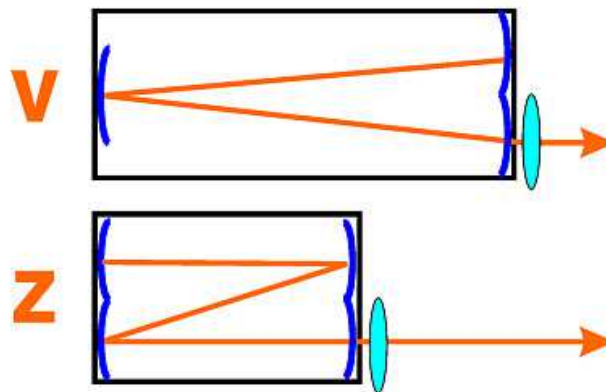
Tvar paprsku z rezonančního obvodu je často čtvercový (obdélníkový) a je optickým systémem transformovaný na kruhový s požadavkem nejvyššího výkonu ve středu paprsku

(gaussově rozložení výkonu). Rezonanční obvod má různé tvary odrazivých zrcadel od rovinných až po vypouklé (používají se častěji). Laserový paprsek může být polarizovaný, nebo může mít náhodnou polarizaci (výhodné pro řezání a dělení materiálů). [10]

Kvalita paprsku závisí jak na kvalitě laserového zdroje, tedy tam kde se paprsek vytváří (dutina s optickým rezonátorem, tvořená odrazivými zrcadli), ale taky na způsobu vytvořené rezonanční dutiny. Zrcátka mohou být rovnoběžná, nebo zakřivená. Následně optika upravuje vlastní paprsek do požadovaného průměru a vlastností. Lze tak mít rozbíhavý paprsek nebo velmi úzký a koncentrovaný paprsek, podle aplikace daného stroje. Paprsek pak jde na výstupní optiku, která je tvořena čočkami z ZnSe materiálu, často s nažloutlým povrchem. Některé optiky jsou zcela mléčné a neprůhledné pro lidské oko a viditelné spektrum (pro 10,6 μm jsou zcela transparentní). Tato výsledná optika zaostří paprsek do nejmenšího místa a bod / spot / je okolo 0,2 mm pro CO₂ značící lasery.[10]

3.5.4 Ovlivnění životnosti rezonátoru a laseru

Teplota rezonátoru má významný vliv na životnost laseru. Obecně platí, čím větší průměr paprsku tím méně je optický systém tepelně namáhán a zvyšuje se tak jeho životnost. Současně při komplikovaném řešení soustavy zrcátek dochází ke vzniku nestabilního vedení paprsku laseru a prodražení systému. Životnost rezonátoru lze také prodloužit volbou materiálu trubice rezonančního obvodu. Trubice vyrobené ze skla mají podstatně menší životnost než trubice vyrobené z hliníkových monobloků z důvodu lepšího vedení a tím odvádění tepla. Dle tvaru rezonanční komory a počtu rezonančních zrcátek nazýváme CO₂ lasery V shape nebo Z shape. Pokud je rezonanční komora prodloužena dalším zrcadlem, tak dojde k jejímu zkrácení a tím i menším zástavbovým rozměrům. Naopak je potřeba ochladit takto malý prostor.[10]



Obr. 23. Typy rezonátorů [10]

3.5.5 Zaostřovací vzdálenost laseru

Lasery jako optické zařízení používají principu lomu světla a jeho fokusaci / zaostření na povrch, kde se na malém bodě koncentruje značná energie pulzu. U CO₂ laserů se používá Beam Expander, který rozšiřuje paprsek z laserového zdroje. Smyslem je mít co největší paprsek vstupující na zaostřovací výstupní optiku laseru. Proto Beam expandery mají standardně hodnoty zvětšení 1,5x až 6x. Běžně se používá zvětšení okolo 3x, kdy je nejlepší poměr cena a výkon. Paprsek laseru je v místě teoretického výpočtu nejmenší, ale v praxi se používá i oblast nad fokusací a pod fokusací (Pre focus / Post focus) a to kolem hodnot +/- 4 mm. Sice se rozostří paprsek a pak je stopa větší. Někdy je naopak vyžadující koncentrace výkonu rozložena na větší plochu, což tolik neovlivní materiál. [10]

3.5.6 Výhody a nevýhody CO₂ laseru

- Vhodný pro zpracování organických a polymerních materiálů.
- Při řezání běžných ocelí vykazuje rychlejší opracování než vláknový laser.
- U svařování z důvodu větší šířky paprsku dosahuje CO₂ laser kvalitnějšího svaru.
- Nevýhodou CO₂ laseru je obtížnější údržba vedení laserového paprsku, nutností je absolutní čistota cesty paprsku.

3.6 Využití laserů v praxi

Laserové paprsky jsou v dnešní době nezastupitelné a jsou využívány v řadě aplikací. Z důvodu možnosti fokusace laserového paprsku na velmi malou plochu dochází na této plošce ke koncentraci velkého množství tepelné energie. Laserový paprsek lze tedy využít

přímo jako nástroj nebo pouze jako podpůrný prvek při klasickém obrábění. Nastínění možností použití laserového obrábění je popsáno v následujících kapitolách.

3.6.1 Dělení materiálu laserem

Pro dělení materiálu laserem lze použít sublimační, tavné nebo řezání plamenem. Sublimační řezání je uskutečňováno pomocí odpařování materiálu z místa řezu. K tomuto způsobu je nutné dosáhnout vysoké intenzity laserového záření. Intenzitu laseru lze nastavit vhodným nastavením parametrů a optiky laseru. Vytvořené kovové páry jsou z místa řezu odfukovány asistenčním plynem, který nesmí způsobovat oxidaci materiálu (dusík, argon). Při sublimačním způsobu řezání nedochází k tavení materiálu, proto je řez hladký a bez otřepů. [8]

Tavné řezání vyžaduje nižší výkony než sublimační, jelikož nedochází k okamžitému odpaření materiálu, ale dochází k tavení materiálu. Roztavený materiál je z řezného místa odstraňován proudem stlačeného inertního plynu (většinou dusíkem). [8]

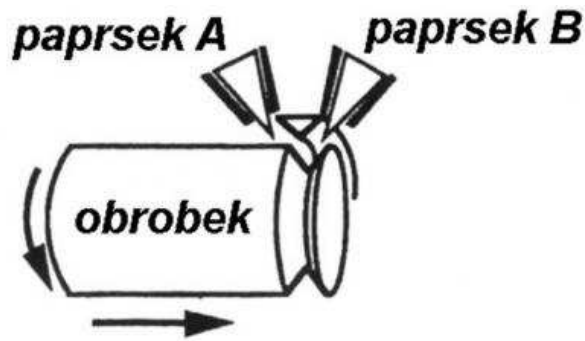
Řezání plamenem je podobné jako řezání tavné, ale místo inertního plynu je přiváděn do řezaného místa kyslík. Používá se pro řezání běžných a konstrukčních ocelí. Při samotném procesu řezání je materiál ohříván na teplotu vyšší, než je zápalná teplota materiálu a tím dojde k exotermické reakci, která dodává energii procesu řezání. Výhodou řezání materiálu laserem je vysoká rychlost obrábění při poměrně dobré přesnosti. Nevýhodou je tzv. podřezání materiálu vlivem fokusace paprsku. [8]

3.6.2 Soustružení podporované laserem

Jde o náhradu ostří nástroje za laserový paprsek. Ten je veden tak, aby pod úhlem 20° dopadal na rozhraní materiálu a těleso obrobku. Materiál je povrchově natavován a vrstva taveniny (tříska) je stírána nástrojem. [5]

3.6.3 Soustružení laserem

Jedná se o kombinaci dvou paprsků laseru. Na obrobek působí pouze paprsek laseru. Tím nedochází k mechanickému úběru materiálu a nástroj se přímo nestýká s obrobkem. Při soustružení laserem nedochází k otřesům obrobku vlivem mechanického styku s nástrojem. Tímto způsobem lze soustružit těžkoobrobitelné materiály, ale nevýhodou je tepelně ovlivněná vrstva obrobku a menší úběr materiálu. Při soustružení působí na materiál dva paprsky laseru pod určitým úhlem vůči sobě a obrobku (viz. obr. 24). [7]

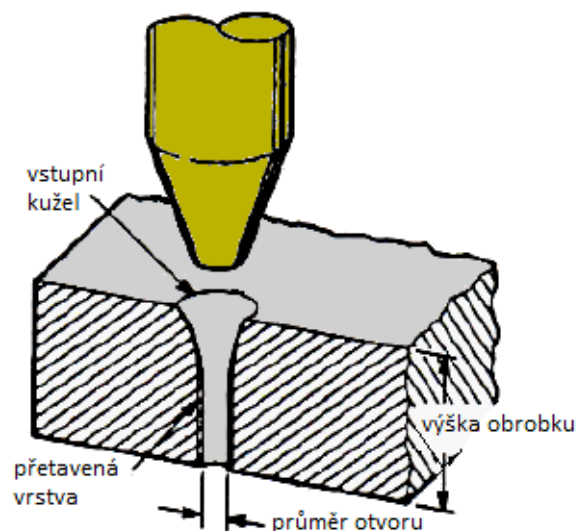


Obr. 24. Soustružení laserem [12]

3.6.4 Vrtání laserem

Při vrtání zahřívá paprsek laseru materiál, který se odpaří a umožňuje průnik paprsku hlouběji. V průběhu vrtání se natavovaný materiál akumuluje v otvoru, vlivem eroze částic se rozstříkuje po stěnách otvoru. Tlak v otvoru dosahuje hodnot kolem 10^3 až 10^4 MPa a způsobí, že proud natavovaného kovu proudí ven z otvoru rychlostí ultrazvuku. [7]

Při vrtání se používá postup „ablation“. To znamená postupné rychlé odstraňování materiálu z řezu bez jeho ohřátí nad odpařovací teplotu. Pouze malá část materiálu, která se nachází uprostřed laserového paprsku je odpařena. Materiál se tedy při vrtání odstraňuje především ve formě kapaliny a pouze malá část také odpařováním. Tímto způsobem lze vrtat otvory o velikosti 0,0025 - 1,5 mm do materiálů o tloušťce 4 – 6 mm. [7]



Obr. 25. Vrtání paprskem laseru [7]

3.7 Další možnosti aplikace laseru

- Odjehlení obrobených součástí: dochází k ohřátí ostřiny, tak, že se roztaví a odpaří. Používá se YAG laser 300 W.
- Dokončovací obrábění: probíhá pulzním režimem ultrakrátkého pulzu. Materiál je ohříván za rotace a dochází tak k zahlazování mikronerovností po předešlé operaci.
- Gravírování materiálu (značení): v místě dopadu paprsku dochází k ohřátí materiálu, ve kterém nastanou strukturální změny materiálu, případně jeho odpaření do určité hloubky. Výhodou je vysoká rychlost, stálost značení a snadný návrh předloh pro značení.
- Svařování laserem.
- Nanášení povlaků.
- Kalení.
- Pájení.
- Frézování laserem. [5]

4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem praktické části diplomové práce bude porovnat výsledky řezání na CO₂ a vláknovém laseru.

1. Vyřezat vzorky o rozměru 50 x 40 mm na CO₂ a vláknovém laseru.
2. Nasnímat řezné plochy vzorků na mikroskopu a změřit jejich drsnost.
3. Porovnat jakosti řezaných povrchů vzorků obroběných na CO₂ a vláknovém laseru.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ LASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ NA CO₂ A VLÁKNOVÉM LASERU

Pro porovnání výsledné kvality řezu na vláknovém a CO₂ laseru byly vyřezány hranolky z plechů o tloušťkách 6 a 8 mm, rozměry zkušebních těles byly zvoleny 50 x 40 mm. Byly voleny materiály, které se v praxi nejčastěji používají a při jejich dělení se využívá jak tavné řezání (nerezové oceli), tak řezání plamenem za podpory přídavného plynu kyslíku (konstrukční oceli). Při řezání plamenem je jako podpurný plyn přiváděn do místa řezu kyslík, ten podporuje hoření a odvádí materiál z místa řezu. Naopak při metodě řezání tavnou metodou je přiváděn do místa řezu inertní plyn (dusík), který odvádí roztavený materiál z místa řezu a zároveň ho ochlazuje. Jedná se o tři druhy ocelí obvyklých jakostí (konstrukční, nerezové a speciální oteruvzdorné). Budou porovnávány technologické parametry a jakost povrchu daných materiálů s danou tloušťkou plechu. Jak bude dále zřejmé, parametry řezání dodané výrobcem jsou odladěny na materiály, které mají zaručené složení a strukturu materiálu nejvhodnější pro laserové obrábění. V průmyslové praxi se však tyto materiály používají pouze zřídka. Z těchto důvodů byly vzorky vypáleny z materiálů, které jsou v technické praxi běžně používány. Na vláknovém i CO₂ laseru byly vzorky vypáleny nejdříve řeznými parametry dodanými výrobcem a následně provedena optimalizace řezných parametrů s ohledem na volené materiály. Vzorky byly vypáleny na dvou technologicky odlišných laserech ve společnosti MRB Sazovice, spol. s r.o.: na CO₂ laseru Platino od firmy Prima power a na vláknovém laseru LT9 od firmy BLM GROUP.

Vzorky, které byly nejprve vypáleny technologickými parametry dodanými výrobcem, nedosahovaly měřitelné jakosti povrchu. Pro měření byly tyto vzorky tedy nevyhovující. Proto byly řezné parametry postupným odladěním změněny, a použity řezné podmínky, které vykazovaly nejlepší dosaženou kvalitu řezu. Po vypálení byla řezaná plocha v ose x z každého vzorku zvětšena 10x a vyfocena na univerzálním mikroskopu CARL ZEISS. Z výsledků je patrné, že technologické parametry dodané výrobcem jsou nevhodné pro obrábění běžných materiálů.

5.1 Popis zařízení pro obrábění CO₂ laserem

Pro obrábění technologií plynového laseru byl použit stroj Platino vyráběný společností Prima power. Laser je uzpůsoben k řezání plechů. Jako aktivní plyn pro vybuzení paprsku slouží plyn CO₂, další plyny přiváděné do rezonátoru jsou N₂ a He, které slouží k chlazení a depopulaci energetických hladin s nízkou úrovní. Plyny, které se přivádí do řezné hlavy

pro podporu řezání, chlazení a odstraňování roztaveného materiálu z místa řezu jsou dusík a kyslík. Řezná hlava je uložena na rameni, které je poháněno na kuličkových šroubech servomotory. Hlava disponuje otvory pro rychlovýměnné kazety na čočky o průměru 5; 7,5; 10 palce. Menší čočka se používá pro řezání tenkých materiálů z konstrukční oceli do tloušťky 4 mm a nerezové oceli do tloušťky 3 mm. Pro řezání širších plechů je nutné kazetu vyměnit.

Pro vytvoření programu je používán software Sicam, originální software standardně dodávaný výrobcem.

Pracovní parametry stroje:

- Maximální výkon 4 kW.
- Rozsah frekvence rezonátoru 50 – 10 000 Hz.
- Maximální pracovní rozměry opracovávaného plechu jsou 3000 x 1500 mm.
- Rozsah tloušťky řezaného materiálu u běžné konstrukční oceli 0,3 – 20 mm.
- Rozsah tloušťky řezaného materiálu u nerezové oceli 0,3 – 10 mm.
- Rozsah tloušťky řezaného materiálu u hliníku 0,3 – 6 mm.
- Rozměry stroje jsou délka 10 600 mm, šířka 3540mm, výška 2500 mm.
- Polohovací přesnost v ose X a Y 0,03 mm.
- Dosahuje přesnosti obrobku $\pm 0,1$ mm.
- Maximální zrychlení os X, Y, Z je $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.
- Maximální polohovací rychlost $140 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 26. Prim Platino CO₂ Laser



Obr. 27. Řezná hlava a tryska Platino [13]

5.2 Popis zařízení pro obrábění vláknovým laserem

Pro obrábění technologií vláknového laseru byl materiál vyřezán na stroji LT9, který vyrábí společnost BLM GROUP. Je to vláknový laser, kde aktivní prostředí pro vznik laserového paprsku vytváří křemíkové vlákno s příměsí přídavného prvku Ytterbium. Vedení laserového paprsku probíhá pomocí optického vlákna. Plyny, které se přivádí do řezné hlavy pro podporu řezání, chlazení a odstraňování roztaveného materiálu jsou dusík a kyslík. Hlava disponuje čočkou, která je uložena pohyblivě na servomotoru, pro automatické nastavení ohniska. Pod čočkou je krycí sklíčko, které chrání čočku před nečistotami, které by mohly čočku poškodit. Na rozdíl od CO₂ laseru Platino, odpadá

výměna čočky při řezání tenkého a silného materiálu. Zároveň odpadá středění trysky při čištění nebo výměně zaneseného krycího skla.

Pracovní parametry stroje:

- Maximální regulovatelný výkon laserového paprsku 3,4 kW.
- Frekvence laseru 0 – 5000 Hz.
- Maximální rychlost polohovací rychlost 45 000 mm. Min⁻¹.
- Rozměry stroje 10 000 x 7000 x 2500 mm.
- Maximální zdvih osy Z 150 mm.
- Maximální rozměry opracovatelného materiálu 3000 x 1500 mm.
- Rozsah tloušťky řezaného materiálu u běžné konstrukční oceli 0,3 – 20mm.
- Rozsah tloušťky řezaného materiálu u nerezové oceli 0,3 – 12mm.
- Rozsah tloušťky řezaného materiálu u hliníku 0,3 – 10mm.
- Rozsah tloušťky řezaného materiálu u mosazných materiálů 0,3 – 6mm.



Obr. 28. BLM Group Fiber Laser LT9

5.3 Univerzální mikroskop CARL ZEISS

Pro vytvoření snímku řezaného povrchu byl použit univerzální dílenský mikroskop CARL ZEISS. Jeho optický systém je pohyblivý pomocí mikrometrického posuvného šroubu s hodnotou dělení 0,01 mm. Nasvícení focených vzorků bylo zajištěno pomocí externí diodové lampičky. Vzorky byly ustaveny na mikroskopu speciální plastelínou.



Obr. 29. Univerzální mikroskop Carl Zeiss

5.4 Taylor Hobson Talysurf CLI 500

Univerzální drsnoměr firmy Taylor Hobson pro bezdotykové měření drsnosti povrchu všech materiálů a povrchů. Příkladový přístroj zaznamenává data pomocí bezdotykové sondy s CLA konfokální hlavou. Je určen hlavně pro 3D měření, ale bezproblémově zvládne změřit i 2D data. Základem přístrojového vybavení je firemní program Talymap Gold. Tento program získá z naměřených dat strukturu bezdotykově měřeného povrchu. Z naměřených dat pak vyhodnotí a znázorní graf buď ve 2D nebo 3D prostoru a barevně odliší výšky profilu.

- Hmotnost – 55 kg.
- Nosnost – 10 kg.
- Rychlost měření – 30, 15, 10, 5, 1 a 0,5 mm/s.
- Rychlost polohování – max. 30 mm/s.
- Délka posuvu ve všech osách – 50 mm.
- Parametry.
 - Celkový prostor měření – 100 x 50 x 50 mm.
 - Celkové rozměry – 500 x 310 x 450 mm.

5.5 Charakteristiky řezaných materiálů

Pro vyhodnocení výsledů po obrábění byly použity vždy plechy tloušťky 6 a 8 mm běžné konstrukční ocel 11 375 (S235JRC + N), ořevzdorná ušlechtilá ocel (HARDOX 450) a nerezová ocel 17 240 (X5CrNi18-10, 1.4301).

5.5.1 Chemické složení a základní vlastnosti nerezové oceli 17 240

Tato ocel je nemagnetická, nekalitelná, má sklon ke zpevňování za studena. Zpevňování způsobuje mechanické opracování materiálu např. tažení nebo třískové obrábění. Ocel je odolná proti méně agresivnímu prostředí (voda, slabé alkalické sloučeniny, kyseliny, průmyslové a velkoměstské atmosféry). Ocel je náchylná k mezikrystalické korozi v oblasti tepelného ovlivnění od 450 °C. Tato nerezová ocel může být také použita v potravinářství.

Tab. 2. Chemické složení oceli 17 240 tloušťka 6 mm

Prvek	Maximální obsah %
Uhlík (C)	0,018
Křemík (Si)	0,335
Mangan (Mn)	1,44
Fosfor (P)	0,0321
Síra (S)	0,0043
Dusík (N)	0,0516
Chrom (Cr)	18,125
Nikl (Ni)	8,074

Tab. 3. Základní pevnostní charakteristiky oceli 17 240 tloušťka 6 mm

Charakteristika	Hodnota
Mez pevnosti (R _m)	610 [MPa]
Mez kluzu (R _{p0,2})	317 [MPa]
Tažnost (A)	0,538
Tvrdost podle Rockwella (HRB)	88 [HRB]

Tab. 4. Chemické složení oceli 17 240 tloušťka 8 mm

Prvek	Maximální obsah %
Uhlík (C)	0,019
Křemík (Si)	0,338
Mangan (Mn)	1,682
Fosfor (P)	0,034
Síra (S)	0,001
Dusík (N)	0,073
Chrom (Cr)	17,8
Nikl (Ni)	8,03

Tab. 5. Základní pevnostní charakteristiky oceli 17 240 tloušťka 8 mm

Charakteristika	Hodnota
Mez pevnosti (Rm)	629,36 [MPa]
Mez kluzu (Rp _{0,2})	358,43 [MPa]
Tažnost (A)	0,5223
Tvrdość podle Rockwella (HRB)	89 [HRB]

5.5.2 Chemické složení a základní vlastnosti konstrukční oceli 11 375

Ocel 11 375 je neušlechtilá, má obvyklou jakost a je vhodná ke svařování. Tato ocel je běžně používána na konstrukci a opláštění strojů. Dále se z této oceli vyrábí duté svařované profily, součásti kované, a jsou vhodné pro použití jako tlakové nádoby do teplot 300 °C.

Tab. 6. Chemické složení oceli 11 375 tloušťka 6 mm

Prvek	Maximální obsah %
Uhlík (C)	0,15
Křemík (Si)	0,01
Mangan (Mn)	0,51
Fosfor (P)	0,014
Síra (S)	0,007
Dusík (N)	0,003
Chrom (Cr)	0,021
Měď (Cu)	0,02
Hliník (Al)	0,045
Vanad (V)	0,001
Molibden (Mo)	0,002
Nikl (Ni)	0,008

Tab. 7. Základní pevnostní charakteristiky oceli 11 375 tloušťka 6 mm

Charakteristika	Hodnota
Mez pevnosti (R _m)	416 [MPa]
Mez kluzu (R _{p0,2})	282 [MPa]
Tažnost (A)	33%

Tab. 8. Chemické složení oceli 11 375 tloušťka 8 mm

Prvek	Maximální obsah %
Uhlík (C)	0,06
Křemík (Si)	0,201
Mangan (Mn)	0,4
Fosfor (P)	0,004
Síra (S)	0,007
Dusík (N)	0,005
Chrom (Cr)	0,02
Měď (Cu)	0,08
Hliník (Al)	0,031
Vanad (V)	0,001
Molibden (Mo)	0,008
Níkl (Ni)	0,03

Tab. 9. Základní pevnostní charakteristiky oceli 11 375 tloušťka 8 mm

Charakteristika	Hodnota
Mez pevnosti (Rm)	388 [MPa]
Mez kluzu (Rp _{0,2})	299 [MPa]
Tažnost (A)	0,375

5.5.3 Chemické složení a základní vlastnosti ušlechtilé oceli Hardox 450

Jde o kalené ocelové plechy, které mají nízký obsah uhlíku a legujících prvků tak, aby splňovaly požadavky vysoké pevnosti a tvrdosti při zajištění jejich technologičnosti. Základní rozdíl u vysokopevnostních a otěruvzdorných ocelí je v závěrečné fázi tepelného zpracování (popouštění - v jejich teplotě). Otěruvzdorné oceli se po kalení nepopouští nebo se popouští jen na nízké teploty (cca 200 °C) čili mnohem nižší teploty než vysokopevnostní oceli.

Tab. 10 Chemické složení oceli Hardox 450 tloušťka 6 mm

Prvek	Maximální obsah %
Uhlík (C)	0,193
Křemík (Si)	0,18
Mangan (Mn)	1,28
Fosfor (P)	0,01
Síra (S)	0,001
Dusík (N)	0,002
Chrom (Cr)	0,24
Měď (Cu)	0,01
Hliník (Al)	0,036
Vanad (V)	0,01
Molibden (Mo)	0,05
Bor (B)	0,0013
Titan (Ti)	0,01
Níkl (Ni)	0,08

Tab. 11 Základní pevnostní charakteristiky oceli Hardox 450 tloušťka 6 mm

Charakteristika	Hodnota
Mez pevnosti (R _m)	1360 [MPa]
Mez kluzu (R _{p0,2})	1110 [MPa]
Tvrdość podle Rockwella	116 [HRB]

Tab. 12 Chemické složení oceli Hardox 450 tloušťka 8 mm

Prvek	Maximální obsah %
Uhlík (C)	0,18
Křemík (Si)	0,33
Mangan (Mn)	1,05
Fosfor (P)	0,01
Síra (S)	0,001
Dusík (N)	0,002
Chrom (Cr)	0,32
Měď (Cu)	0,015
Hliník (Al)	0,001
Vanad (V)	0,02
Molibden (Mo)	0,02
Bor (B)	0,0021
Titan (Ti)	0,009
Nikl (Ni)	0,092

Tab. 13. Základní pevnostní charakteristiky oceli Hardox 450 tloušťka 8 mm

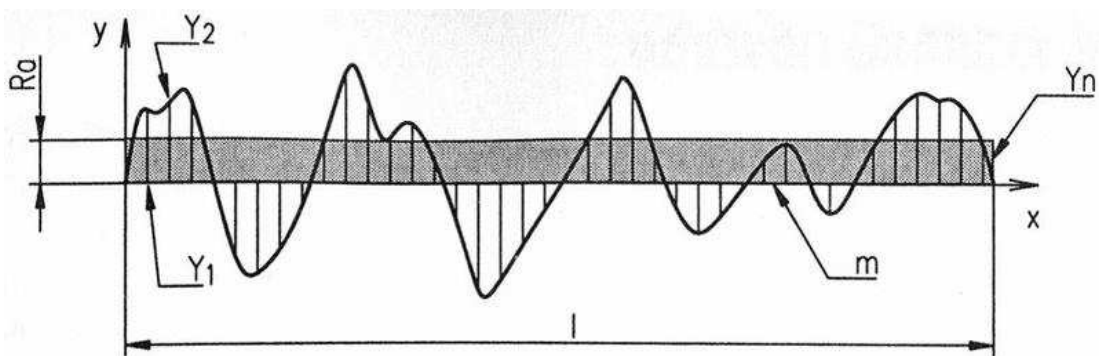
Charakteristika	Hodnota
Mez pevnosti (Rm)	1395 [MPa]
Mez kluzu (Rp _{0,2})	1210 [MPa]
Tvrdość podle Rockwella	115 [HRB]

6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ OBRÁBĚNÍ

Na vzorcích byla změřena drsnost povrchu na drsnoměru firmy Taylor Hobson pro bezdotykové měření drsnosti povrchu. Drsnost je definovaná jako nerovnosti povrchu s velmi malou vzdáleností. Nerovnosti povrchu jsou dány výrobním procesem, metodou obrábění ale také otřesy stroje, které působí na obrobek během výroby. Při vyhodnocování výsledků byla posuzována drsnost povrchu R_a , což je průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu v rozsahu základní délky.

Další změřené parametry přístrojem jsou:

- R_p – největší výška výstupku profilu,
- R_v – největší hloubka prohlubně profilu,
- R_z – nejvyšší výška profilu (v rozsahu základní délky),
- R_c – průměrná výška prvku profilu,
- R_t – celková výška profilu (v rozsahu vyhodnocované délky),
- R_q – průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu,
- R_{sk} – šikmost profilu,
- R_{ku} – špičatost profilu.



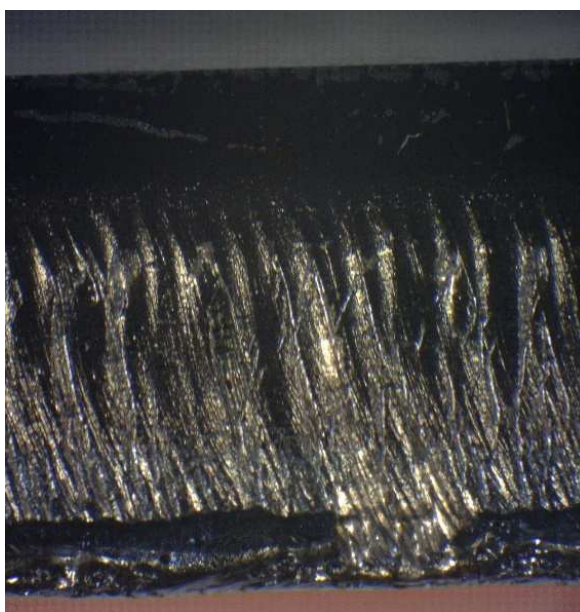
Obr. 30. Drsnost povrchu R_a

6.1 Vláknořezný laser

6.1.1 Řez materiálů na vláknovém laseru- řezné parametry dodané výrobcem

Tab. 14. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál 11 375 tloušťka 6 mm

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Kyslík	0,5	1,2	3,5	2500	2650

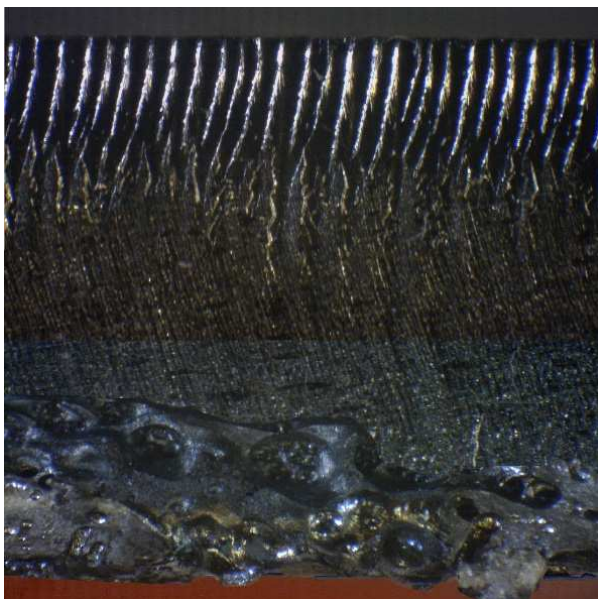


Obr. 31 Řez materiálu 11 375, tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru se řeznými parametry dodanými výrobcem.

Na obrázku je vidět, že laser nebyl schopen obrobit materiál v požadované kvalitě povrchu řezu. Materiál byl prořezán, ale na spodní části řezu vznikl otřep, způsobený špatnou výškou ohniska, rychlostí řezu a nízkým výkonem. Uprostřed řezu jsou drážky, které jsou způsobeny vysokým tlakem plynu k dané rychlosti a výkonu laseru.

Tab. 15. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál 11 375 tloušťka 8 mm

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
8	Kyslík	0,6	1,2	3,5	1850	2700

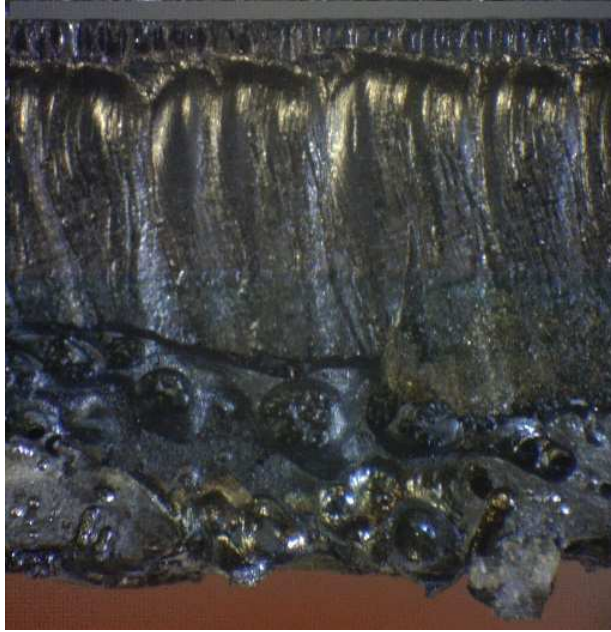


Obr. 32 Řez materiálu 11 375, tloušťka 8 mm, obráběného na vláknovém laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.

Při řezání materiálu 11 375 tloušťky 8 mm řeznými parametry dodanými výrobcem laseru je vidět na horní části řezu drážky, které jsou způsobeny špatnou výškou ohniskové vzdálenosti. Ve spodní části je patrné, že laser neprořezal materiál po celé tloušťce. Výkon laseru je na maximu, nemožnost prořezat materiál je tedy způsoben vysokou rychlostí řezu. Paprsek laseru nestihne při dané řezné rychlosti roztavit materiál po celé jeho tloušťce.

Tab. 16. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál HARDOX 450 tloušťka 6 mm

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Kyslík	0,5	1,2	3,5	2500	2650

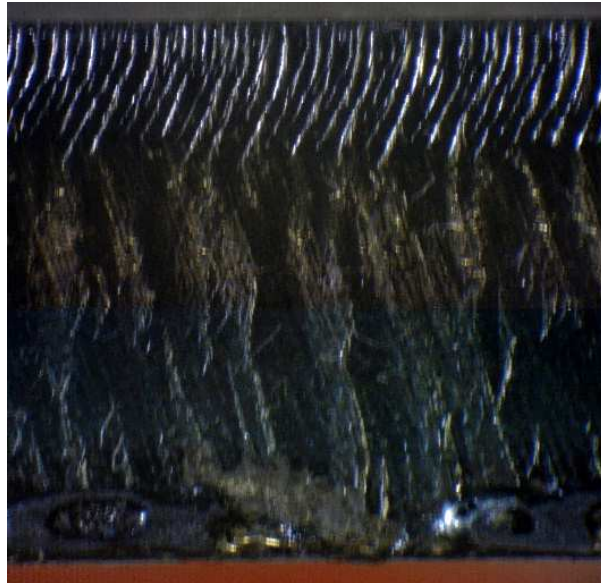


Obr. 33 Řez materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem

Při obrábění otěruvzdorného materiálu Hardox 450 tloušťky 6 mm řeznými parametry dodanými výrobcem nebylo možné materiál prořezat. Na snímku je patrné, že materiál byl nataven pouze z vrchní části a tlak řezného plynu neměl kam odvádět materiál. Kolem prostřední části vznikly krátery vlivem rozfouknutí a v nataveném materiálu vznikají bubliny. Tento děj je následkem vysoké řezné rychlosti při daném výkonu.

Tab. 17. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál Hardox 450 tloušťka 8 mm

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
8	Kyslík	0,6	1,2	3,5	1850	2700



Obr. 34 Řez materiálu HARDOX 450, tloušťka 8 mm, obráběného na vláknovém laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem

Na snímku z obrábění materiálu Hardox 450 tloušťky 8mm (obr. 34) jsou patrné drážky po celé tloušťce, které vznikly špatně zvolenou výškou ohniska, vysokou rychlostí řezu a malým výkonem.

Tab. 18. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál 17 240 tloušťka 6 mm

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Dusík	17	2	-6,7	2300	3080



Obr. 35 Řez materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru s řeznými parametry i dodanými výrobcem.

Při řezání materiálu 17 240 na vláknovém laseru řeznými parametry dodanými výrobcem nedošlo vůbec k propálení materiálu a vzorek nemohl být ani z plechu odebrán a vyfocen pod mikroskopem. U těchto podmínek bylo špatně nastaveno ohnisko a byla špatně zvolená tryska, která ovlivňuje množství protékajícího řezného plynu.

Tab. 19. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál 17 240 tloušťka 8 mm

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
8	Dusík	19	2,5	-8	1300	3080



Obr. 36 Řez materiálu 17 240, tloušťka 8 mm, obráběného na vláknovém laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem

U materiálu 17 240 lze vidět na obr. 36 jasně viditelná hrana, která je typickým znakem malého výkonu při řezání tavnou metodou, což má za následek vznik nežádoucí plazmy při obrábění a obrobek lze sice vyjmout z obráběného plechu, ale není obráběn ve vhodné jakosti.

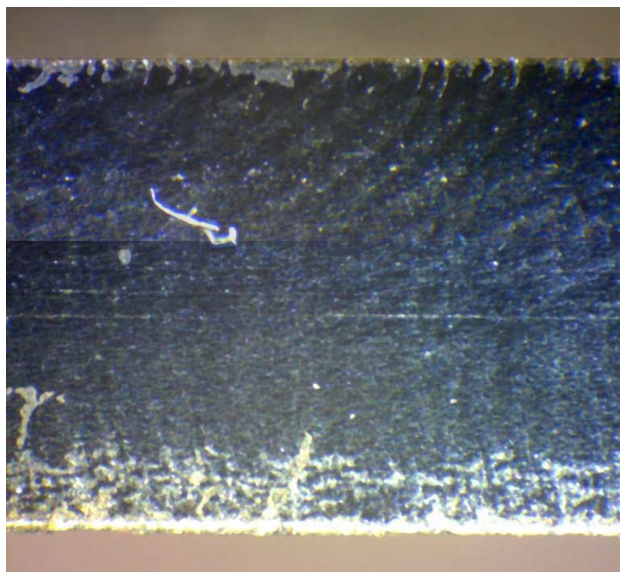
6.1.2 Výsledky měření jakosti řezu vláknového laseru- optimalizované parametry

Vzorky vypálené na vláknovém laseru, byli jednotlivě vyfoceny na univerzálním mikroskopu CARL ZEISS s desetinásobným zvětšením. Dále pak byla na vzorcích změřena drsnost povrchu na drsnoměru firmy Taylor Hobson pro bezdotykové měření drsnosti povrchu.

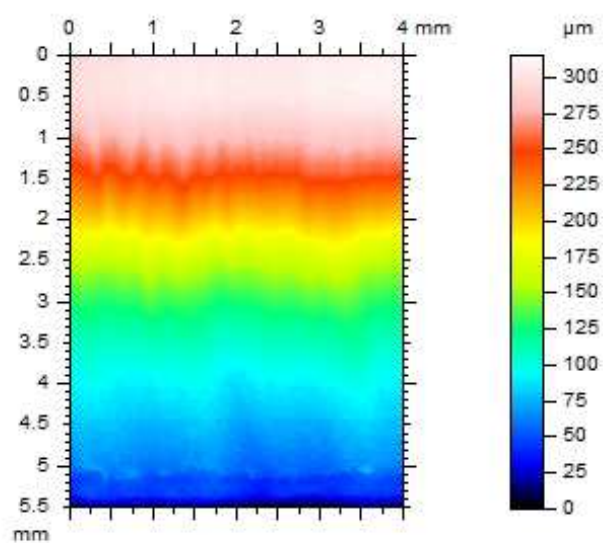
6.1.2.1 Tloušťka 6mm materiál 11 375

Tab. 20. Optimalizované řezné parametry pro materiál 11 375 tloušťka 6 mm vláknového laseru

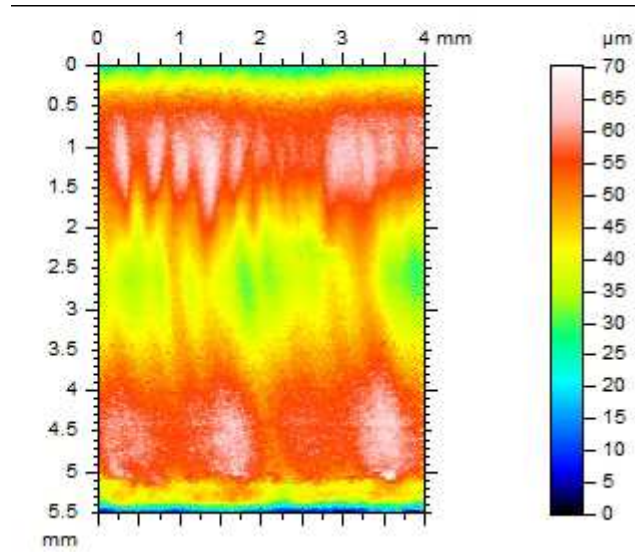
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Kyslík	0,73	1,2	4,4	2600	3080



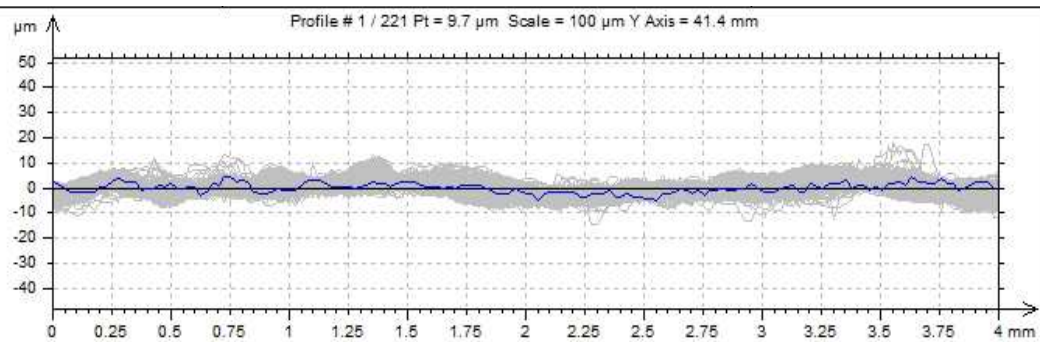
Obr. 37 Řez materiálu 11375 tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.



Obr. 38 Drsnost obroběného povrchu materiálu 11 375, tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru



*Obr. 39 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 6 mm
obráběného na vláknovém laseru s odfiltrovanou vlnitostí*



*Obr. 40 Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka
6 mm obráběného na vláknovém laseru*

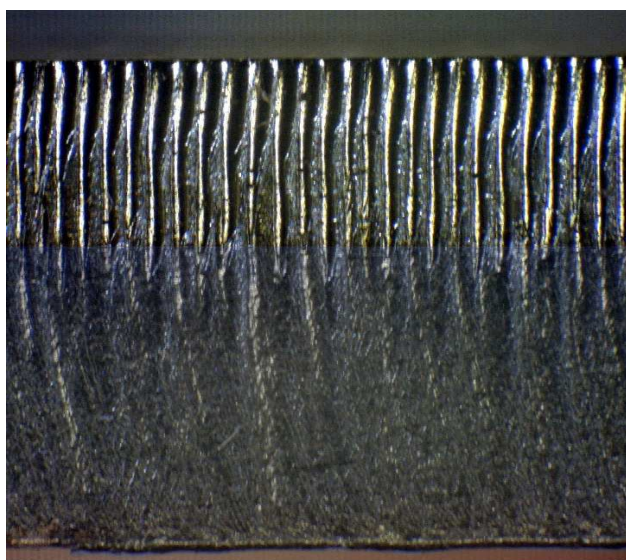
Tab. 21 Hodnoty naměřených drsností povrchu materiálu 11 375 tloušťka 6 mm
obráběného na vláknovém laseru

Veličina	Jednotky	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp	[μm]	3	0,8	1,9	5,4
Rv	[μm]	2,9	0,7	1,6	5,2
Rz	[μm]	5,8	1,4	3,7	9,7
Rc	[μm]	4	1,2	1,9	7,7
Rt	[μm]	8,2	2,4	4,6	21
Ra	[μm]	1,3	0,3	0,7	2,1
Rq	[μm]	1,5	0,4	0,9	2,5
Rsk		0,1	0,4	-1,3	1,2
Rku		3,2	0,8	2,1	7,6

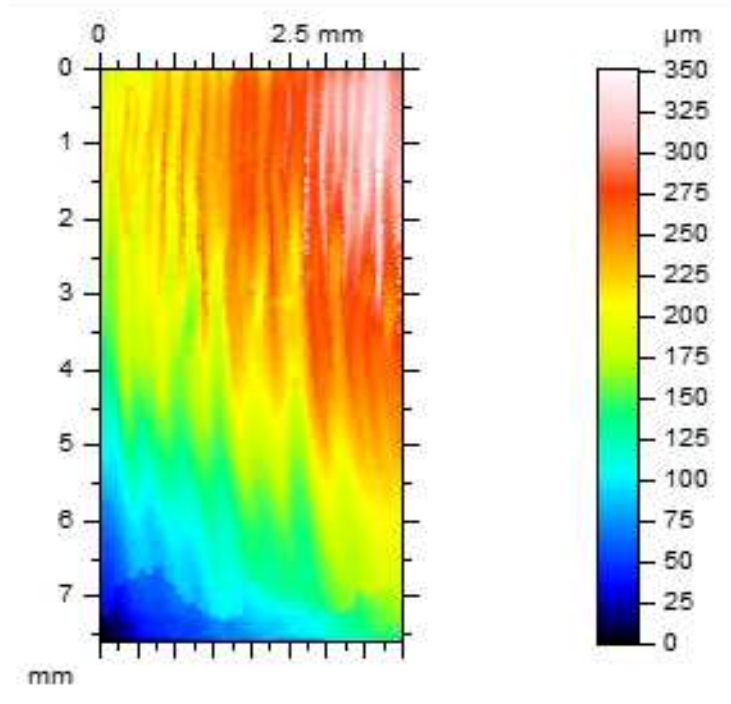
6.1.2.2 Tloušťka 8mm materiál 11 375

Tab. 22. Optimalizované řezné parametry pro materiál 11 375 tloušťka 8 mm
vláknového laseru

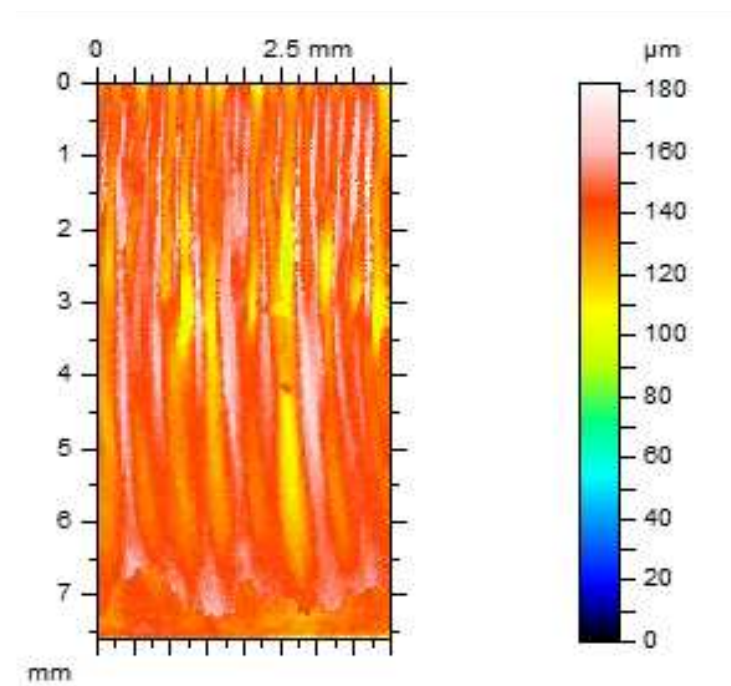
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	Výkon [W]
8	Kyslík	0,5	1,2	4	1700	3050



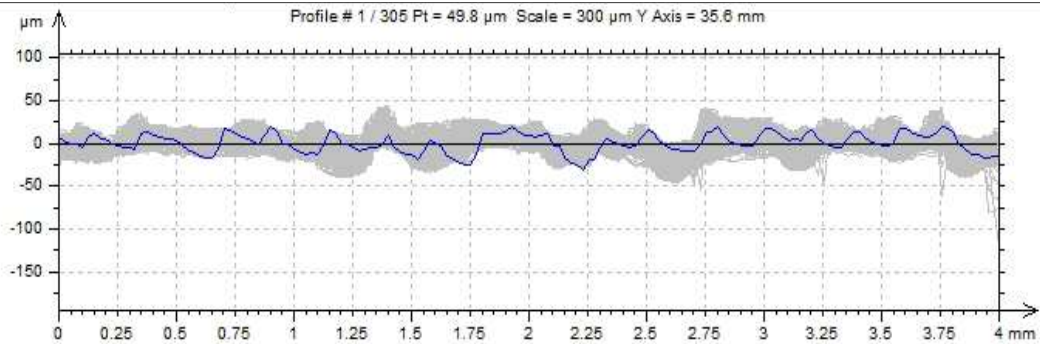
Obr. 41 Řez materiálu 11375 tloušťka 8 mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.



Obr. 42 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm
obráběného na vláknovém laseru



Obr. 43 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm
obráběného na vláknovém laseru s odfiltrovanou vlnitostí



Obr. 44 Graf naměřených drsností obroběného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru

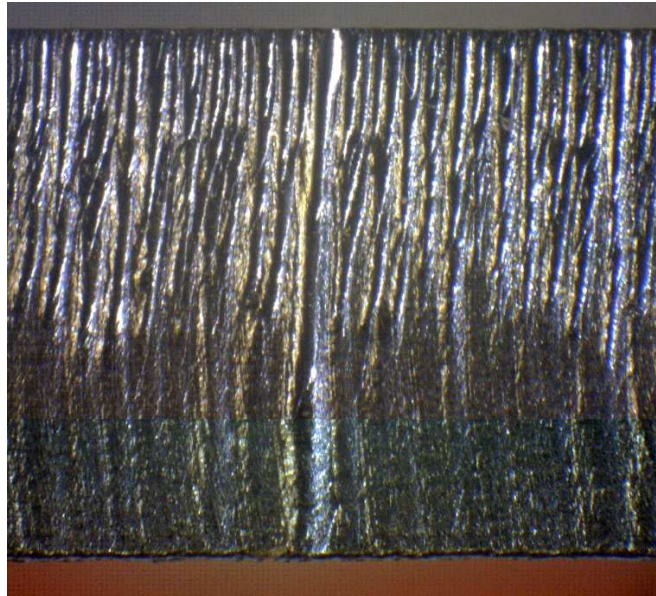
Tab. 23 Hodnoty naměřených drsností obroběného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru

Veličina	Jednotky	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

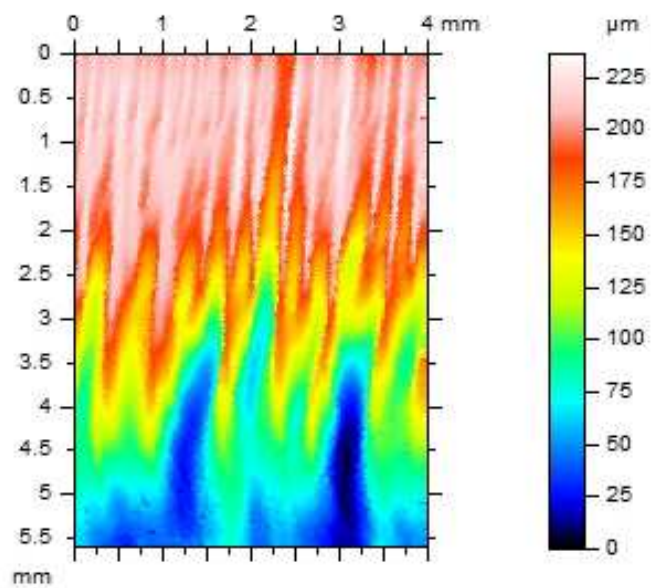
6.1.2.3 Tloušťka 6mm materiál Hardox 450

Tab. 24. Optimalizované řezné parametry pro materiál Hardox 450 tloušťka 6 mm vláknového laseru

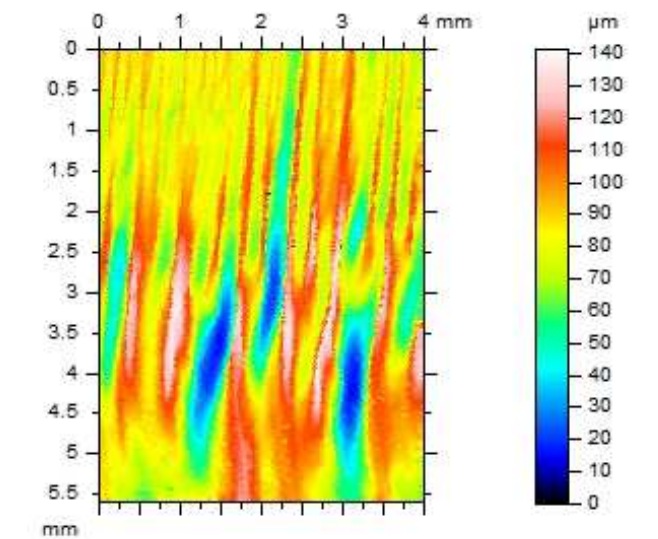
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Kyslík	0,73	1,2	4,4	1300	3080



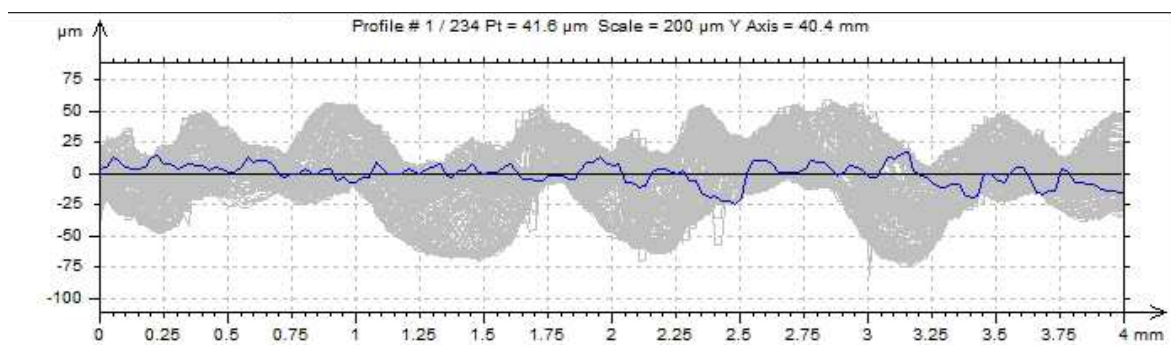
Obr. 45 Řez materiálu Hardox 450 tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.



Obr. 46 Drsnost obroběného povrchu materiálu Hardox 450 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru



*Obr. 47 Drsnost obrobeneho povrchu materialu Hardox 450 tloušťka 6 mm
obrabeneho na vlaknovem laseru s odfiltrovanou vlnitostí*



*Obr. 48 Graf namerenych drsnosti obrobeneho povrchu materialu HARDOX 450
tloušťka 6 mm obrabeneho na vlaknovem laseru*

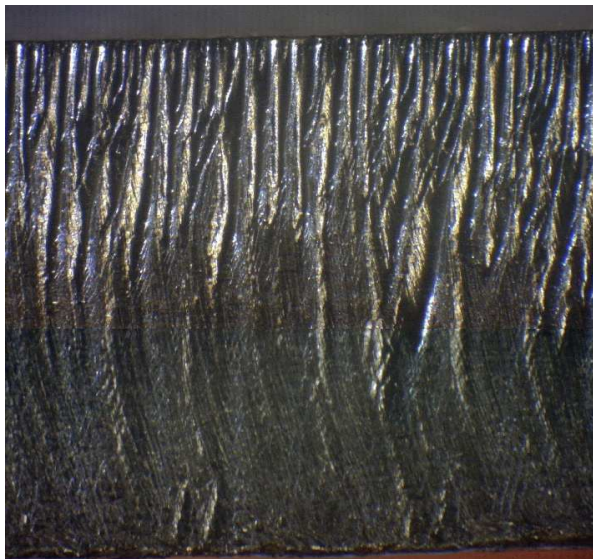
Tab. 25 Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu Hardox 450 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru

Veličina	Jednotky	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp	[μm]	22,5	10,5	6	39,8
Rv	[μm]	19,1	7,2	7,2	34,2
Rz	[μm]	41,6	17,5	14,5	70
Rc	[μm]	35	17,2	10,2	69
Rt	[μm]	57,1	19,2	20,4	92,5
Ra	[μm]	10,6	5,1	3,5	19
Rq	[μm]	12,4	5,7	4,3	21,4
Rsk		0,1	0,5	-1,3	0,9
Rku		3,4	1,2	1,8	6,9

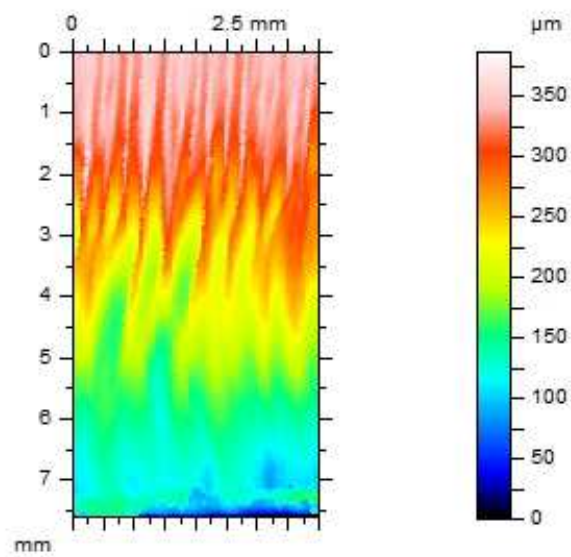
6.1.2.4 Tloušťka 8mm materiál Hardox 450

Tab. 26. Optimalizované řezné parametry pro materiál Hardox 450 tloušťka 8 mm vláknového laseru

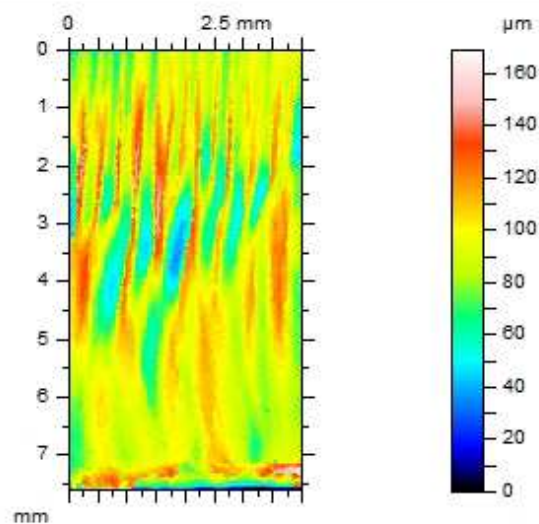
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	Výkon [W]
8	Kyslík	0,5	1,2	4	900	3050



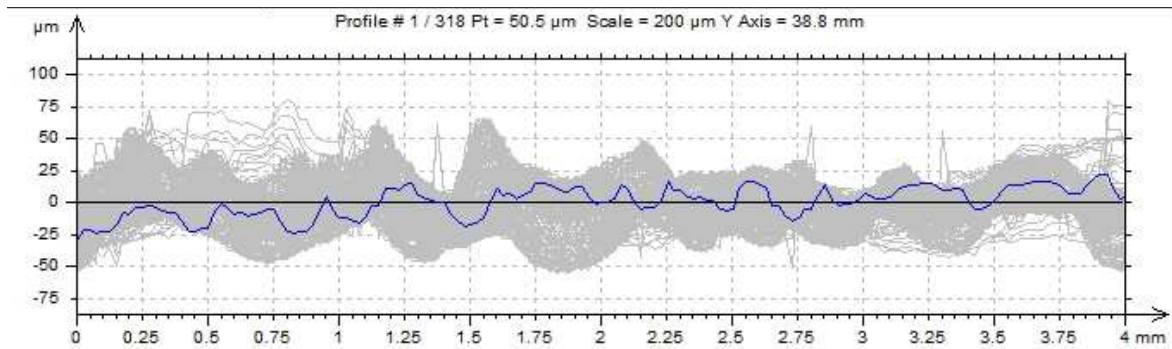
Obr. 49 Řez materiálu Hardox 450 tloušťka 8mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.



*Obr. 50 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450 tloušťka 8 mm
obráběného na vláknovém laseru*



*Obr. 51 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450 tloušťka 8 mm
obráběného na vláknovém laseru s odfiltrovanou vlnitostí*



Obr. 52 Graf naměřených drsností obroběného povrchu materiálu Hardox 450 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru

Tab. 27 Hodnoty naměřených drsností obroběného povrchu materiálu HARDOX 450 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru

Veličina	Jednotky	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp	[µm]	2,6	11,6	5,9	42,9
Rv	[µm]	16,2	7,2	5,5	34,2
Rz	[µm]	36,8	18,4	12,5	69,2
Rc	[µm]	29,2	15,8	7,6	63,8
Rt	[µm]	49,2	24,7	14,8	109
Ra	[µm]	8,9	4,6	3	17,5
Rq	[µm]	10,6	5,4	3,6	20,6
Rsk		0,2	0,5	-1,2	2,1
Rku		3,1	1,6	2	18,9

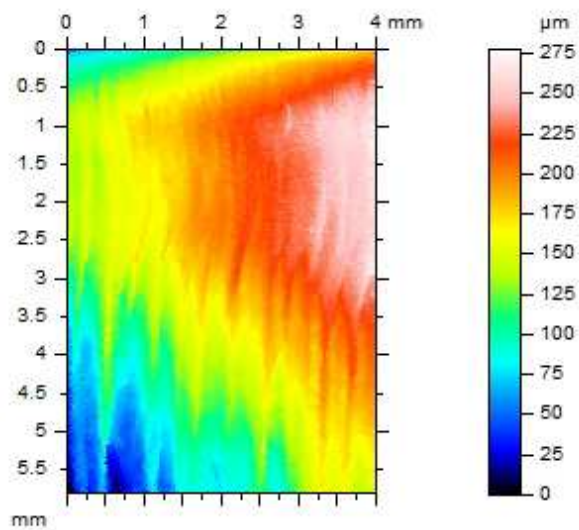
6.1.2.5 Tloušťka 6mm materiál 17 240

Tab. 28. Optimalizované řezné parametry pro materiál 17 240 tloušťka 6 mm vláknového laseru

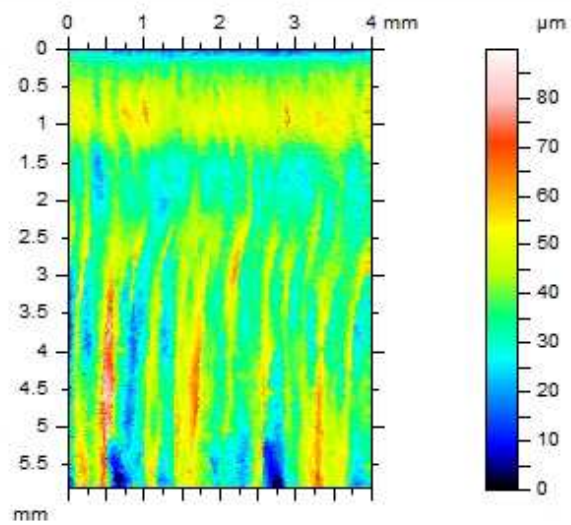
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Dusík	17	2,5	-5,7	2100	3080



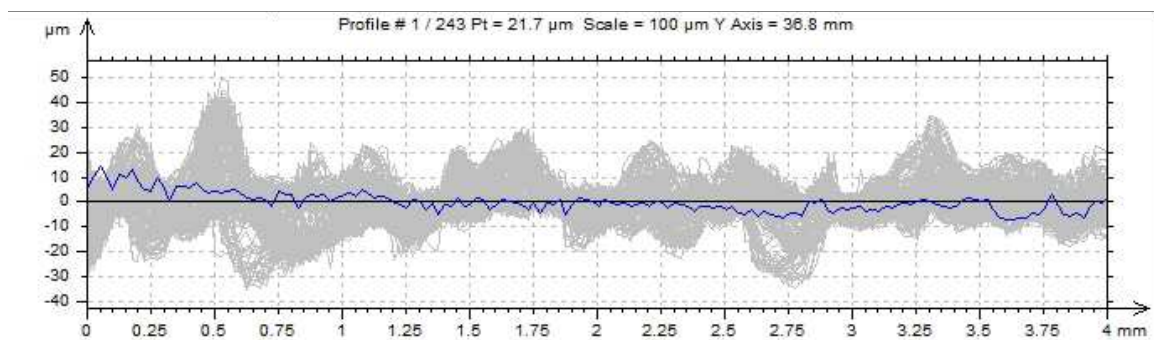
Obr. 53 Řez materiálu 17 240 tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.



Obr. 54 Drsnost obroběného povrchu materiálu 17 240 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru



Obr. 55 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17240 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru s odfiltrovanou vlnitostí



Obr. 56 Graf naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 17 240 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru

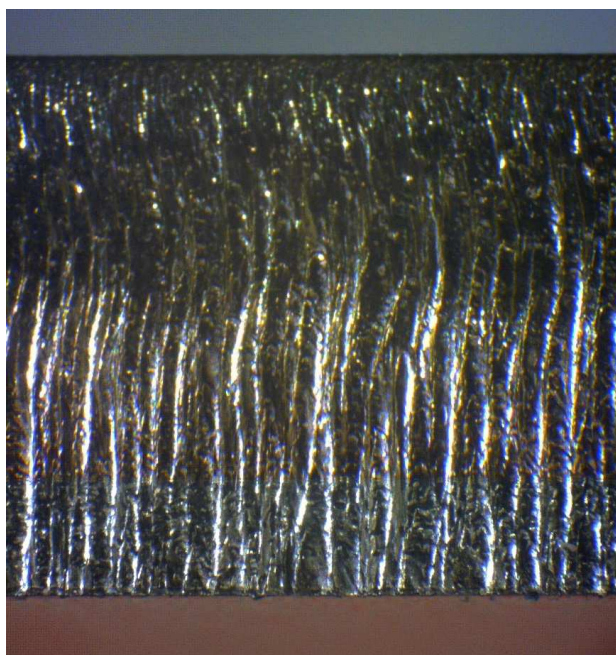
Tab. 29 Hodnoty naměřených drsností obroběného povrchu materiálu 17 240 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru

Veličina	Jednotky	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp	[μm]	12	5,7	2,9	21
Rv	[μm]	9	3,5	3	17,7
Rz	[μm]	21	9,1	6	38,2
Rc	[μm]	14,8	6,9	3,4	26,7
Rt	[μm]	30,4	13,8	7,9	57,3
Ra	[μm]	4,5	2	1,1	8
Rq	[μm]	5,5	2,5	1,4	9,9
Rsk		0,4	0,6	-1,2	1,5
Rku		4,3	1,2	2,3	8,5

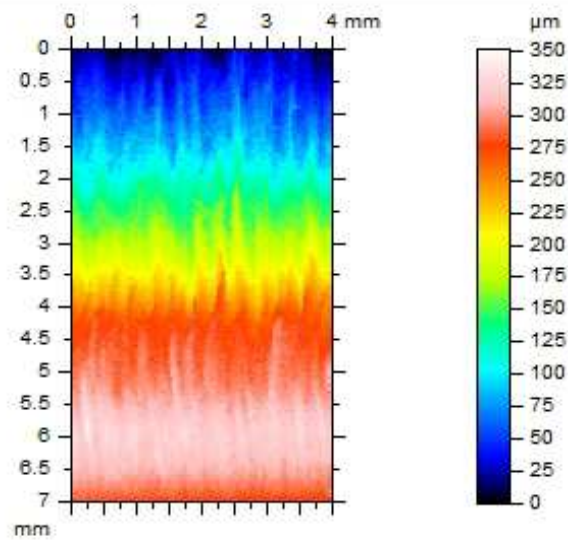
6.1.2.6 Tloušťka 8mm materiál 17 240

Tab. 30. Optimalizované řezné parametry pro materiál 17 240 tloušťka 8 mm vláknového laseru

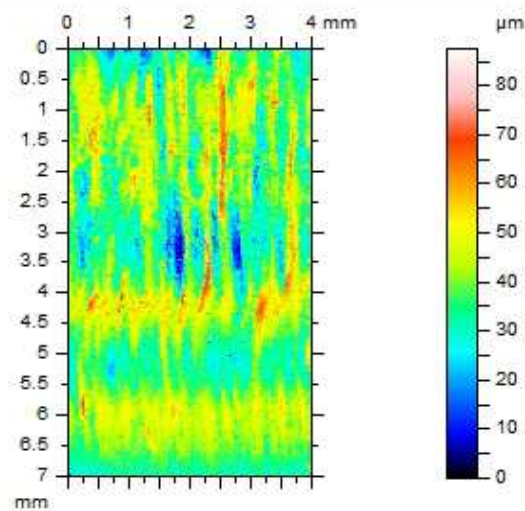
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	Výkon [W]
8	Dusík	19,3	2,5	-7,3	1200	3080



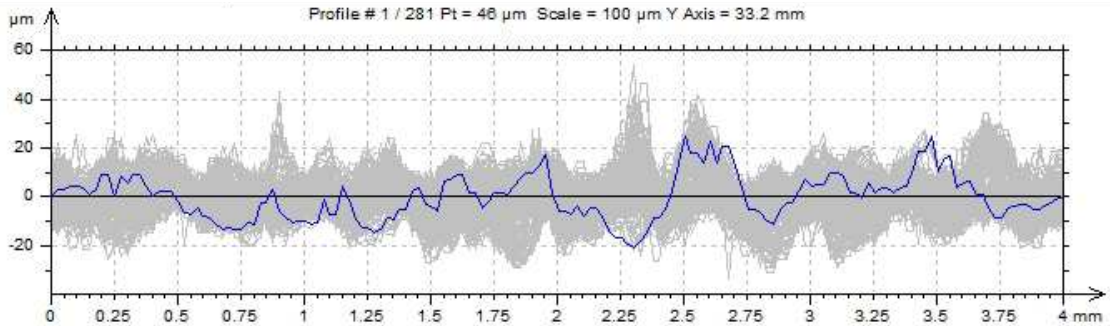
Obr. 57 Řez materiálu 17 240 tloušťka 8 mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.



Obr. 58 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17240 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru



Obr. 59 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17240 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru s odfiltrovanou vlnitostí



Obr. 60 Graf naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 17 240 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru

Tab. 31 Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 17 240 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru

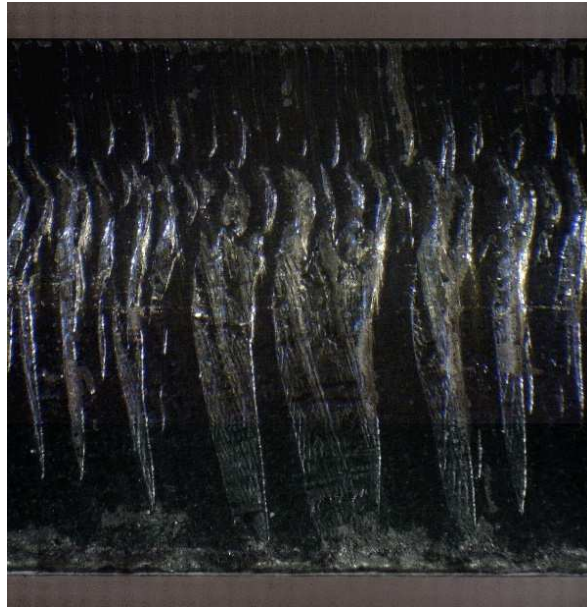
Veličina	Jednotky	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp	[µm]	11,2	3,58	3,47	19,9
Rv	[µm]	10	3,02	3,49	15,8
Rz	[µm]	21,2	6,43	7,17	34,8
Rc	[µm]	14,3	4,9	3,88	23,1
Rt	[µm]	30,3	10,3	10,3	58,4
Ra	[µm]	4,33	1,4	1,33	6,53
Rq	[µm]	5,35	1,69	1,7	8,25
Rsk		0,247	0,352	-0,625	1,75
Rku		3,89	1,37	2,08	10,4

6.2 CO₂ laser

6.2.1 Řez materiálů na CO₂ laseru- řezné parametry dodané výrobcem

Tab. 32. Řezné podmínky CO₂ laseru dodané výrobcem pro materiál 11 375 tloušťka 6 mm

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Kyslík	0,7	1	0,7	2700	4000

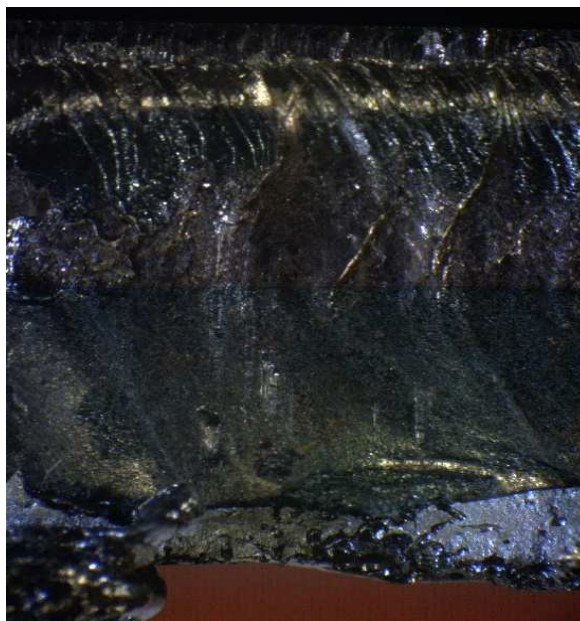


Obr. 61 Řez materiálu 11 325 tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.

Na obrázku je vidět, že laser nebyl schopen obrobit materiál v požadované kvalitě povrchu řezu. Materiál byl prořezán, ale uprostřed řezu jsou drážky, které jsou způsobeny vysokým tlakem plynu k dané rychlosti a výkonu laseru.

Tab. 33. Řezné podmínky CO₂ laseru dodané výrobcem pro materiál 11 375 tloušťka 8 mm

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
8	Kyslík	0,4	1,5	1,5	2100	4000

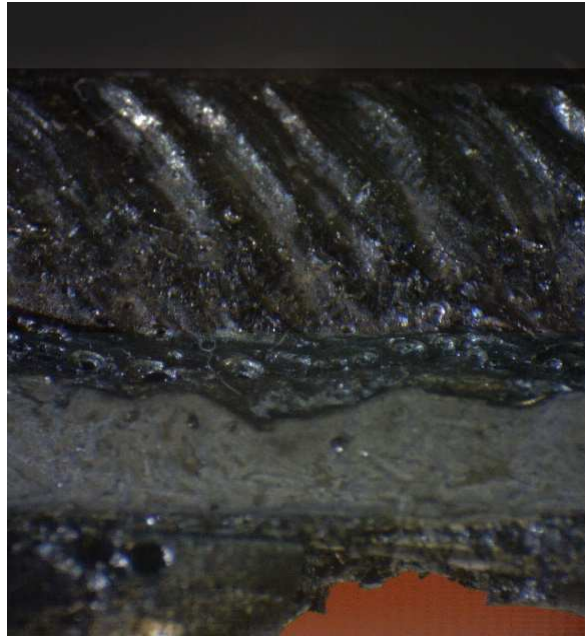


Obr. 62 Řez materiálu 11 375 tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.

U tloušťky 8 mm materiálu 11 375, obráběného na CO₂ laseru řeznými parametry dodanými výrobcem nebylo možné materiál prořezat. Na obrázku je patrné, že materiál byl nataven z vrchní části a tlak řezného plynu stejně jako při obrábění na vláknovém laseru řeznými parametry dodanými výrobcem neměl kam odvádět materiál. Kolem prostřední části vznikly krátery z důvodu rozfouknutí nataveného materiálu a vznik bubliny. Toto je následkem vysoké řezné rychlosti při daném výkonu. V horní části je vidět hrana, která vzniká z důvodu špatné výšky ohniska.

Tab. 34. Řezné podmínky CO₂ laseru dodané výrobcem pro materiál HARDOX 450 tloušťka 6 mm

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Kyslík	0,7	1	0,7	2700	4000

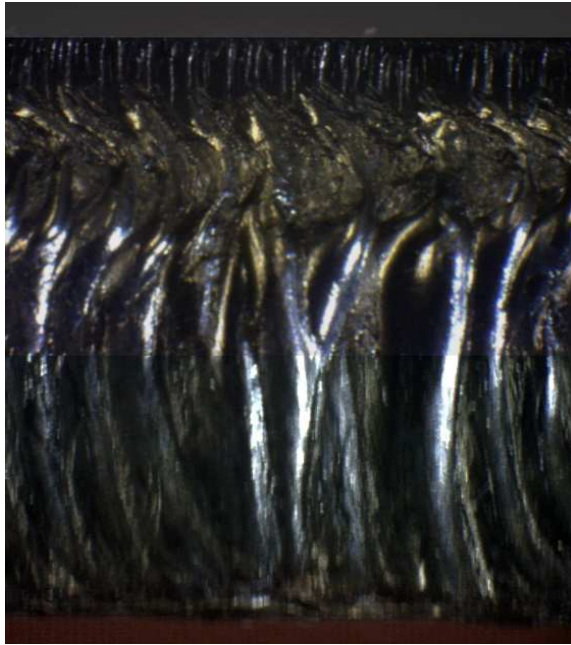


Obr. 63 Řez materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.

U otěruvzdorného materiálu Hardox 450 obráběného základními parametry dodanými výrobcem bylo špatně zvolená ohnisková vzdálenost, která způsobila na spodní části materiálu otřep. V horní části obrázku můžeme pozorovat drážky, které způsobuje vysoký tlak plynu vzhledem k výkonu laseru a řezné rychlosti.

Tab. 35. Řezné podmínky CO₂ laseru dodané výrobcem pro materiál Hardox 450 tloušťka 8mm

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
8	Kyslík	0,4	1,5	1,5	2100	4000

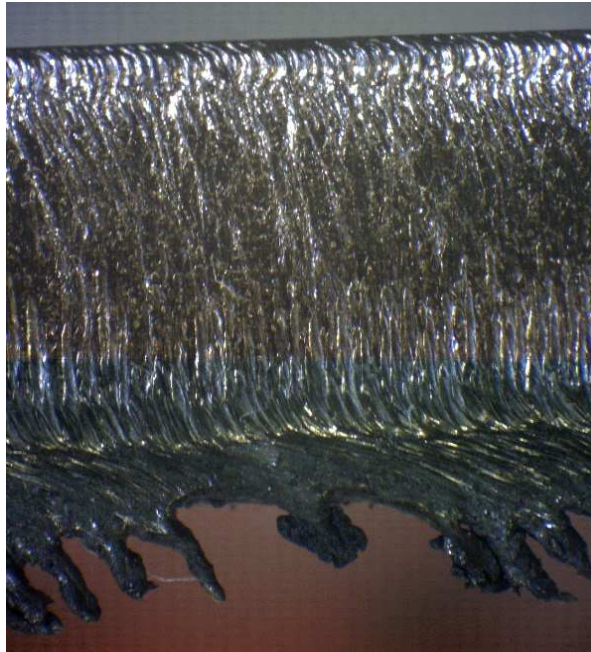


Obr. 64 Řez materiálu Hardox 450, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.

Na obrázku je možné ve spodní části pozorovat drážky, které způsobuje vysoká rychlost řezu při vysokém výkonu. V horní části lze pozorovat hranu, která je způsobená špatně zvoleným ohniskem.

Tab. 36. Řezné podmínky dodané výrobcem pro materiál 17 240 tloušťka 6 mm CO₂ laseru

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Dusík	13	2	-6,5	1350	4000



Obr. 65 Řez materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.

U materiálu 17 240 řezaného základními parametry dodaných výrobcem laseru je vidět poměrně ucházející jakost řezu, ale na spodní části materiálu vznikl otřep, který způsobil nízký tlak řezného plynu společně se špatně zvolenou výškou ohniska.

Tab. 37. Řezné podmínky dodané výrobcem pro materiál 17 240 tloušťka 8 mm CO₂ laseru

Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
8	Dusík	14	2,5	-9	1000	4000



Obr. 66 Řez materiálu 17 240, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.

Při řezání materiálu 17 240 na CO₂ laseru základními parametry nedošlo vůbec k propálení materiálu a vzorek nemohl být ani z plechu odebrán. U těchto podmínek bylo špatně nastaveno ohnisko a byla nevhodně zvolená tryska, která ovlivňuje množství protékajícího řezného plynu. Z důvodu možného poškození čočky laseru a s tím spojené finanční náklady na opravy nebyl vzorek pálen celý.

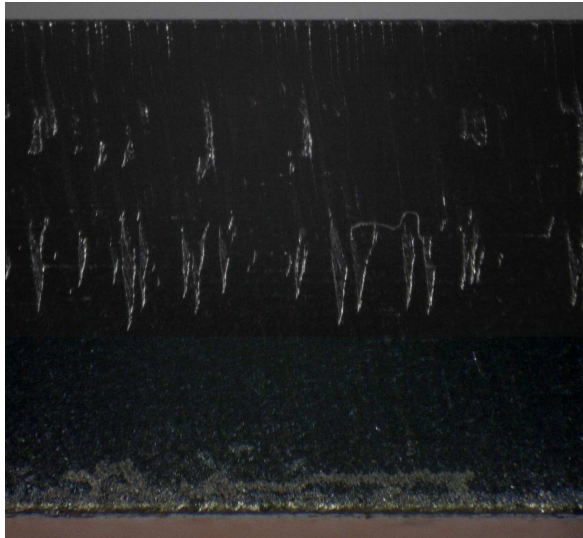
6.2.2 Výsledky měření jakosti řezu materiálů na CO₂ laseru - optimalizované parametry

Vzorky vypálené na CO₂ laseru, byli jednotlivě vyfoceny na univerzálním mikroskopu CARL ZEISS s desetinásobným zvětšením. Dále pak byla na vzorcích změřena drsnost povrchu na drsnoměru firmy Taylor Hobson pro bezdotykové měření drsnosti povrchu.

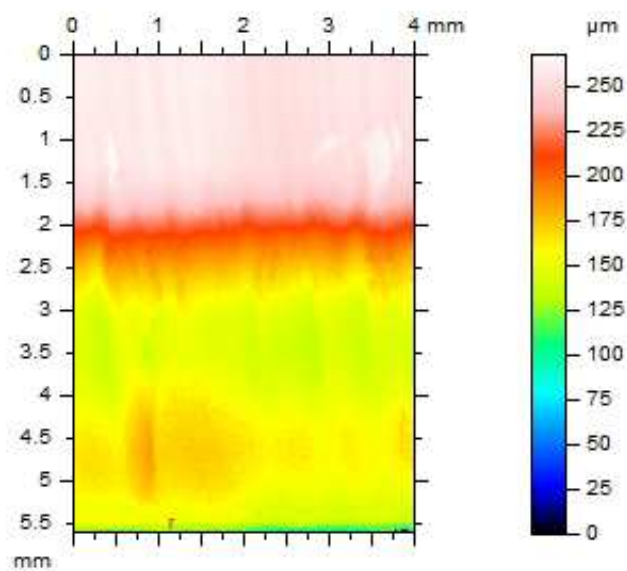
6.2.2.1 Tloušťka 6mm materiál 11 375

Tab. 38. Optimalizované řezné parametry pro materiál 11 375 tloušťka 6 mm CO₂ laseru

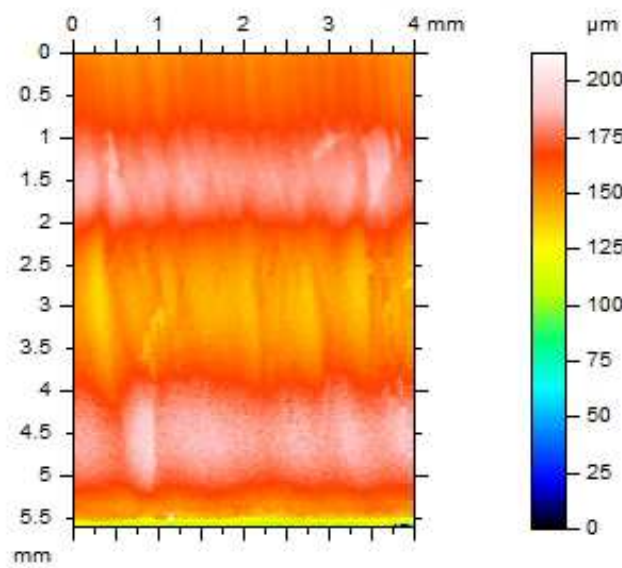
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Kyslík	0,5	1	0,2	2700	3600



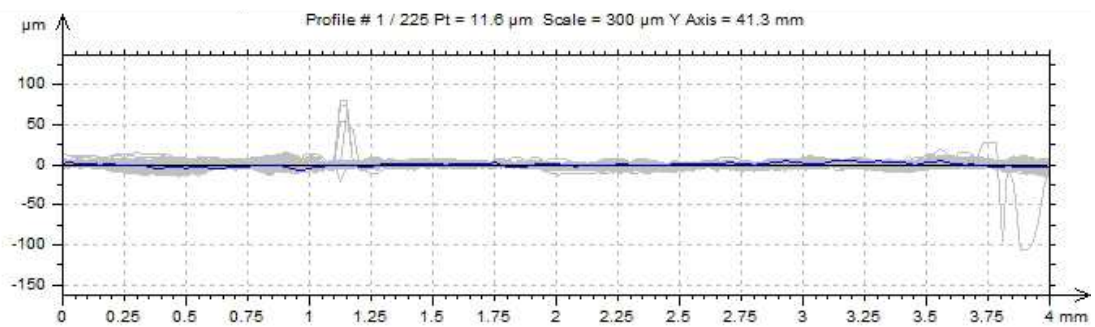
Obr. 67 Řez materiálu 11375, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.



Obr. 68 Drsnost obroběného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru



Obr. 69 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 6 mm
obráběného na CO₂ laseru s odfiltrovanou vlnitostí



Obr. 70 Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka
6 mm obráběného na CO₂ laseru

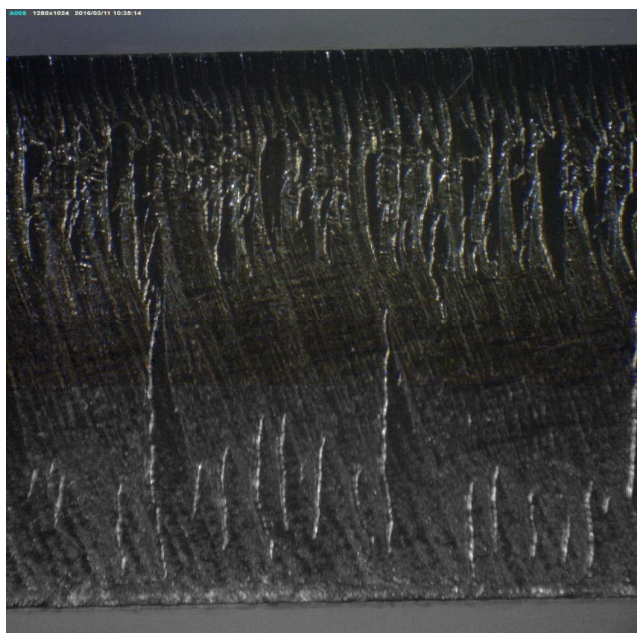
Tab. 39 Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 11 375
tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru

Veličina	Jednotky	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp	[μm]	3,8	2,1	1,7	21,1
Rv	[μm]	3,8	1,2	1,8	7,9
Rz	[μm]	7,6	3,1	3,5	27,8
Rc	[μm]	5,3	2,4	2,3	26,6
Rt	[μm]	12,6	10,4	4,7	106,8
Ra	[μm]	1,5	0,5	0,8	3,8
Rq	[μm]	1,9	0,7	0,9	6,3
Rsk		0,3	2	-5,9	18,2
Rku		7,5	20,3	2,2	207,9

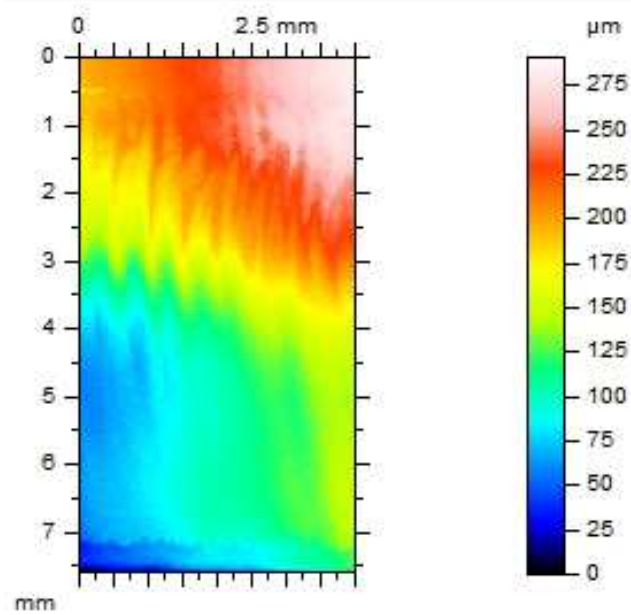
6.2.2.2 Tloušťka 8mm materiál 11 375

Tab. 40. Optimalizované řezné parametry pro materiál 11 375 tloušťka 8 mm CO₂
laseru

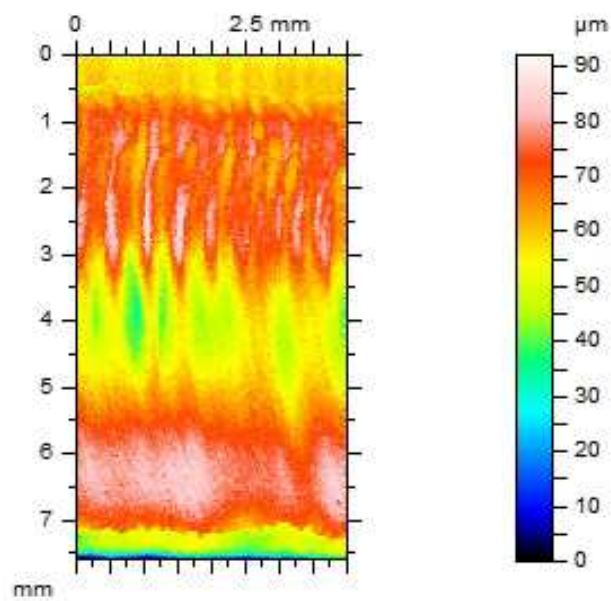
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
8	Kyslík	0,5	1,5	0	2100	3400



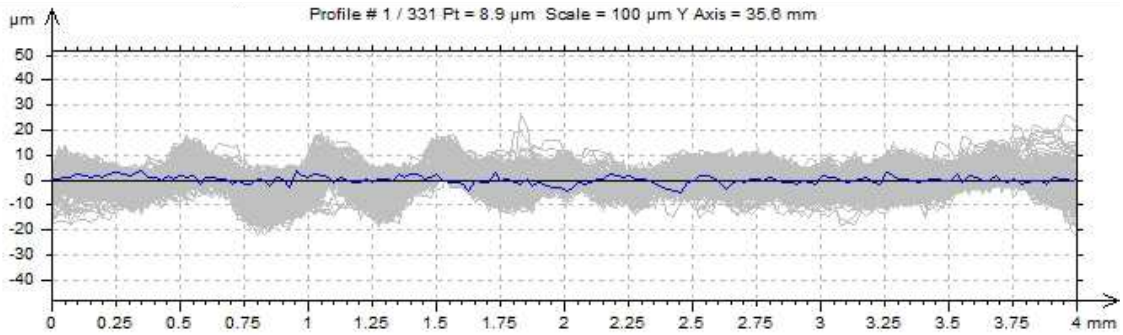
Obr. 71 Řez materiálu 11375, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.



*Obr. 72 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm
obráběného na CO_2 laseru*



*Obr. 73 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm
obráběného na CO_2 laseru s odfiltrovanou vlnitostí*



Obr. 74 Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru

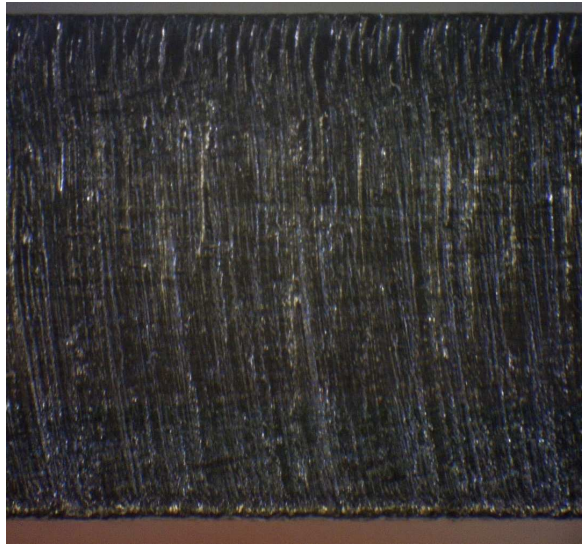
Tab. 41 Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru

Veličina	Jednotky	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp	[µm]	5,5	2,9	1,8	12,8
Rv	[µm]	5,1	2,1	2	10
Rz	[µm]	10,6	4,9	4,1	21,6
Rc	[µm]	7,6	4,5	2,2	19,3
Rt	[µm]	15	6,6	5,3	30,7
Ra	[µm]	2,3	1,3	0,8	5,5
Rq	[µm]	2,8	1,5	1	6,3
Rsk		0	0,5	-1,7	3
Rku		3,7	1,6	2,2	24,1

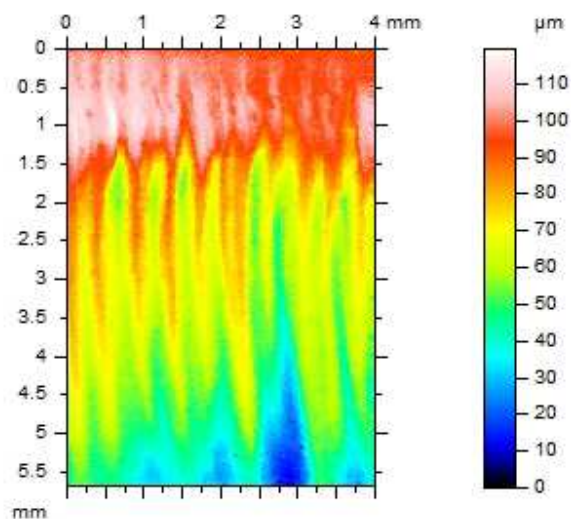
6.2.2.3 Tloušťka 6mm materiál Hardox 450

Tab. 42. Optimalizované řezné parametry pro materiál Hardox 450 tloušťka 6 mm CO₂ laseru

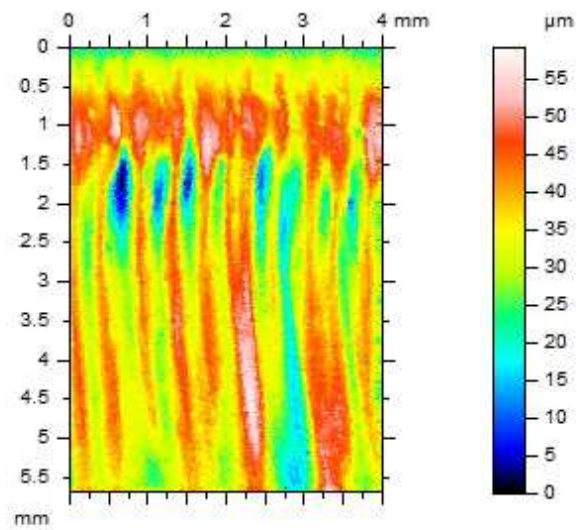
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Kyslík	0,5	1	0,2	2500	3600



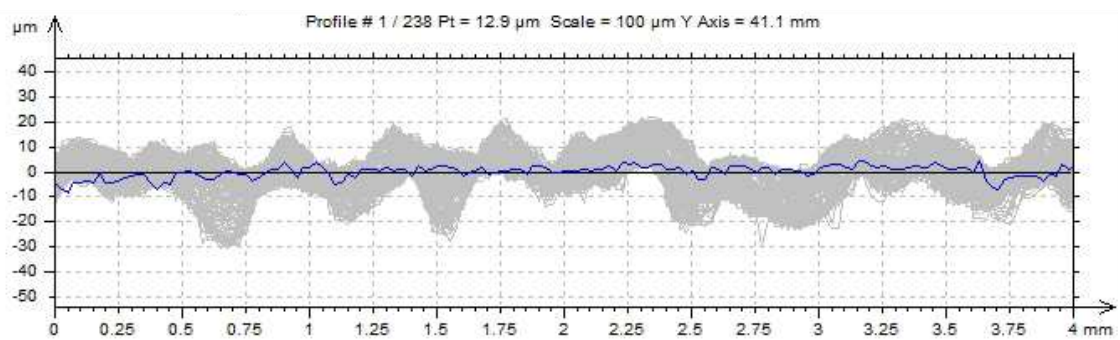
Obr. 75 Řez materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.



Obr. 76 Drsnost obroběného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru



*Obr. 77 Drsnost obroběného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm
obroběného na CO₂ laseru s odfiltrovanou vlnitostí*



*Obr. 78 Graf naměřené drsnosti obroběného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 6
mm obroběného na CO₂ laseru*

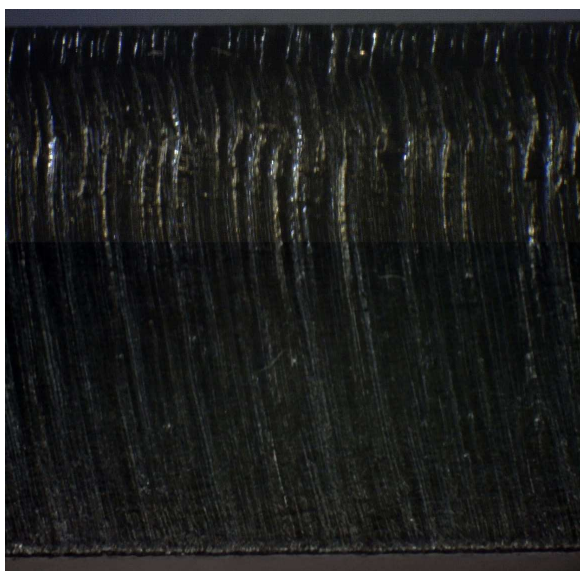
Tab. 43 Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru

Veličina	Jednotky	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp	[μm]	8	2,4	2,1	13,5
Rv	[μm]	8,5	3,2	2,5	16,9
Rz	[μm]	16,5	5,5	4,7	29,5
Rc	[μm]	12,8	4,5	3	22,9
Rt	[μm]	21,4	6,7	5,6	39,1
Ra	[μm]	3,9	1,4	1	6,9
Rq	[μm]	4,6	1,6	1,2	8,3
Rsk		0	0,3	-0,9	0,7
Rku		2,6	0,6	1,9	6,4

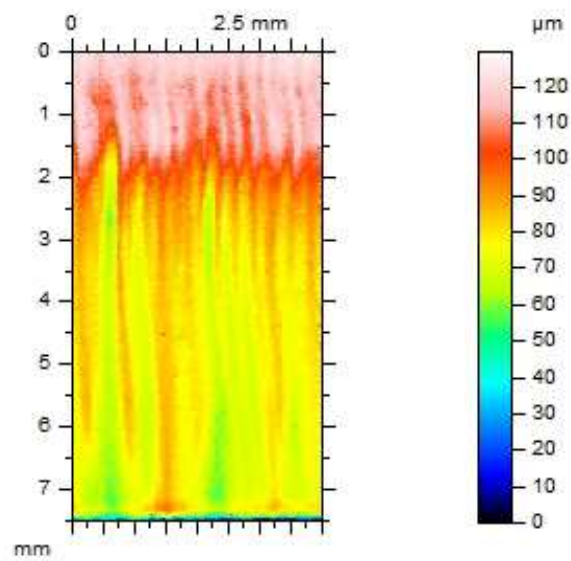
6.2.2.4 Tloušťka 8mm materiál Hardox 450

Tab. 44. Optimalizované řezné parametry pro materiál Hardox 450 tloušťka 8 mm CO₂ laseru

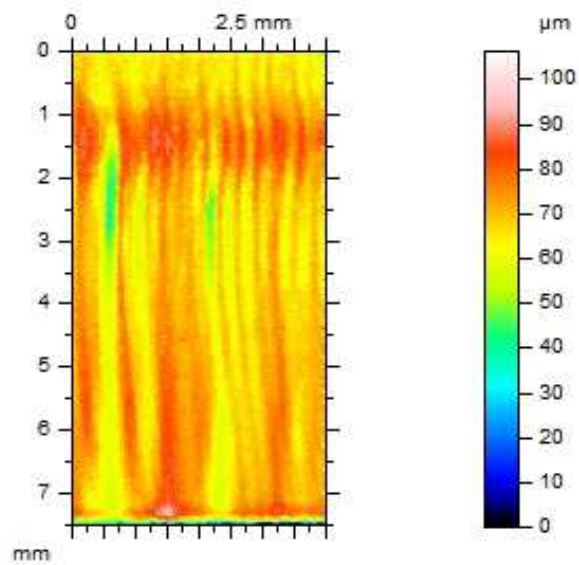
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
8	Kyslík	0,5	1,5	0	1900	3400



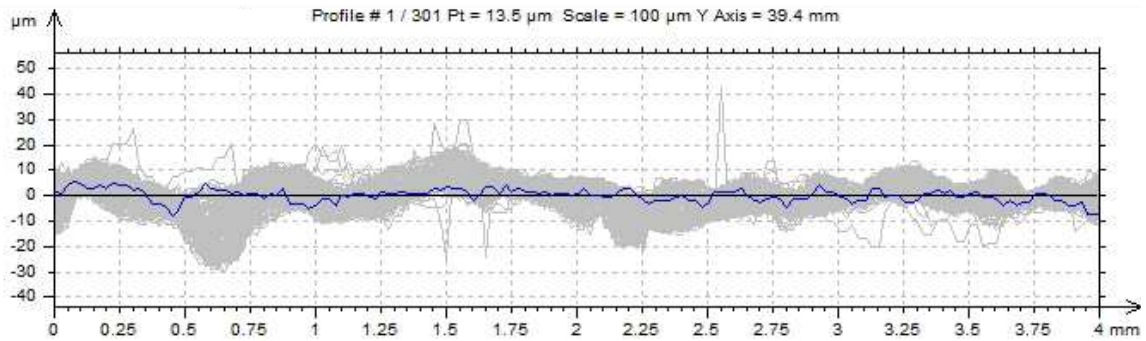
Obr. 79 Řez materiálu Hardox 450, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.



*Obr. 80 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 8 mm
obráběného na CO₂ laseru*



*Obr. 81 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm
obráběného na CO₂ laseru s odfiltrovanou vlnitostí*



Obr. 82 Graf naměřené drsnosti obroběného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru

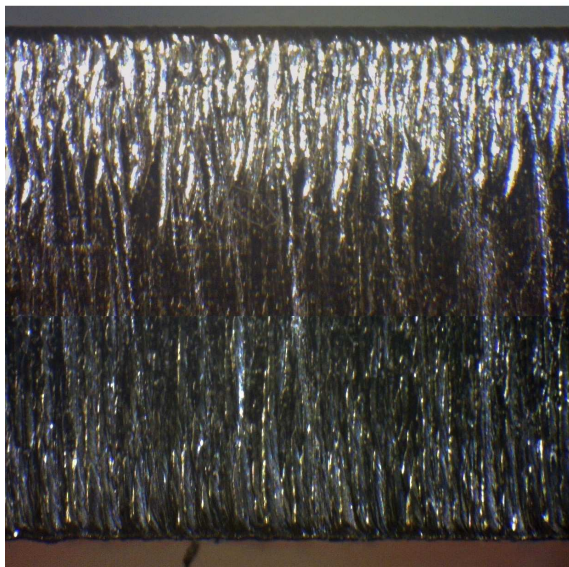
Tab. 45 Hodnoty naměřených drsností obroběného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru

Veličina	Jednotky	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp	[µm]	6,3	1,8	2,8	12,7
Rv	[µm]	6,4	2	3,3	12,7
Rz	[µm]	12,7	3,6	6,5	22,6
Rc	[µm]	8,6	2,4	4,2	15,8
Rt	[µm]	18,4	6,4	7,2	45,6
Ra	[µm]	2,8	0,8	1,4	4,6
Rq	[µm]	3,4	1	1,7	5,6
Rsk		-0,1	0,5	-1,5	1,7
Rku		3,7	1,4	2,1	21,3

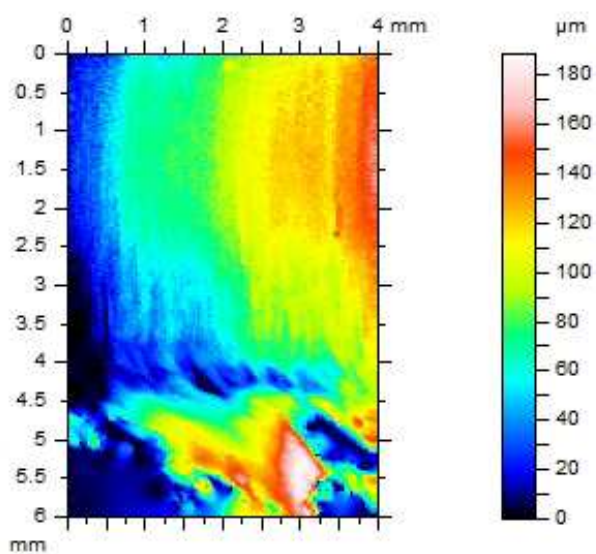
6.2.2.5 Tloušťka 6mm materiál 17 240

Tab. 46. Optimalizované řezné parametry pro materiál 17 240 tloušťka 6mm CO₂ laseru

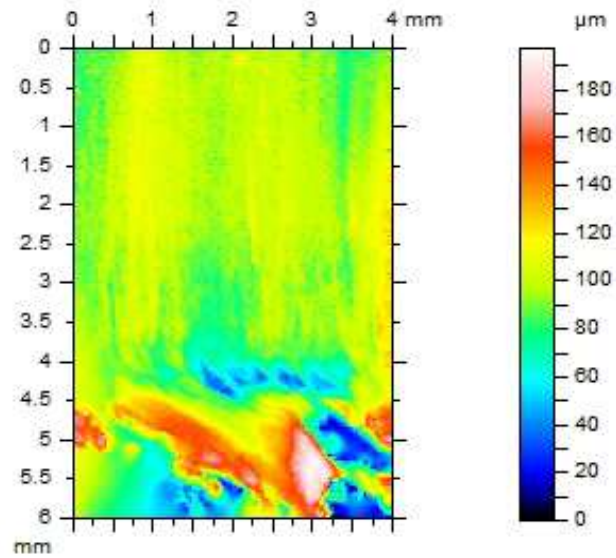
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
6	Dusík	15	1,8	-6	1100	3860



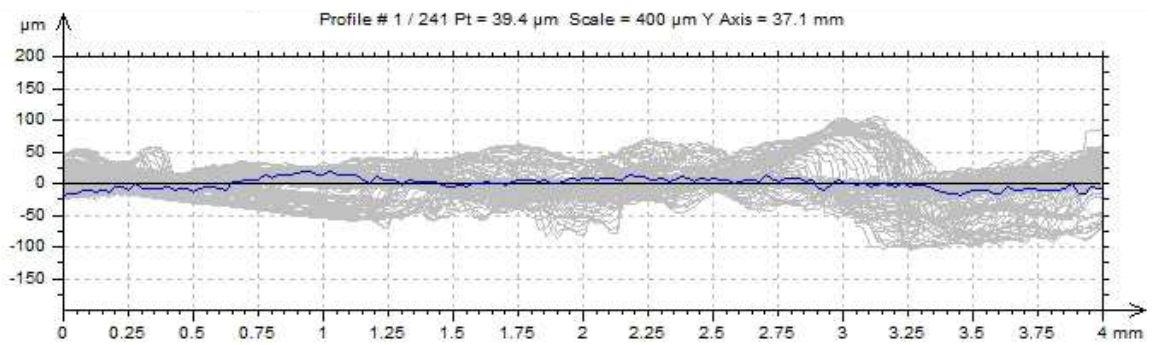
Obr. 83 Řez materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.



Obr. 84 Drsnost obroběného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru



Obr. 85 Drsnost obrobeneho povrchu materialu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru s odfiltrovanou vlnitostí



Obr. 86 Graf naměřené drsnosti obrobeneho povrchu materialu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru

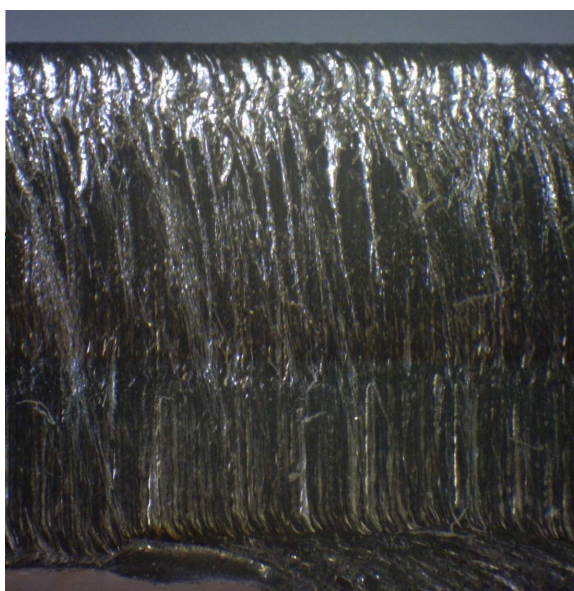
Tab. 47 Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru

Veličina	Jednotky	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp	[μm]	10,4	5,6	4,4	28,8
Rv	[μm]	10	5,9	4,6	41,9
Rz	[μm]	20,4	11,2	9,7	70,6
Rc	[μm]	15,9	13,2	5,3	78,4
Rt	[μm]	35,3	26,3	13,3	140,5
Ra	[μm]	4,2	2,5	1,9	13,6
Rq	[μm]	5,3	3,2	2,4	17,1
Rsk		0,2	0,7	-2,3	2,6
Rku		5,3	4,5	2,1	44,5

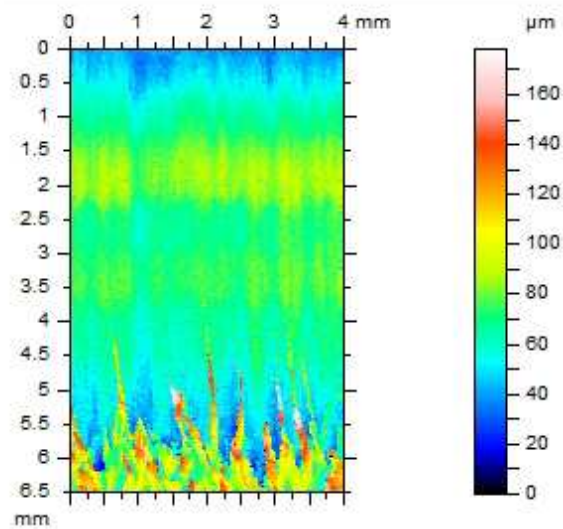
6.2.2.6 Tloušťka 8mm materiál 17 240

Tab. 48. Optimalizované řezné parametry pro materiál 17 240 tloušťka 8 mm CO₂ laseru

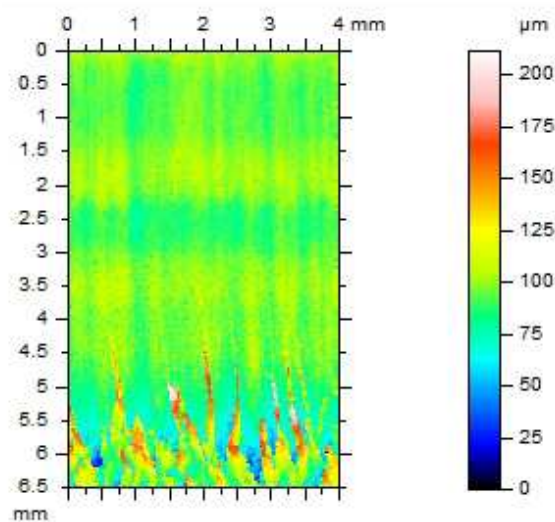
Tloušťka [mm]	Řezný plyn	Tlak plynu [bar]	Průměr řezné trysky [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná rychlost [mm.min ⁻¹]	Výkon [W]
8	Dusík	16	2	-11,5	800	3900



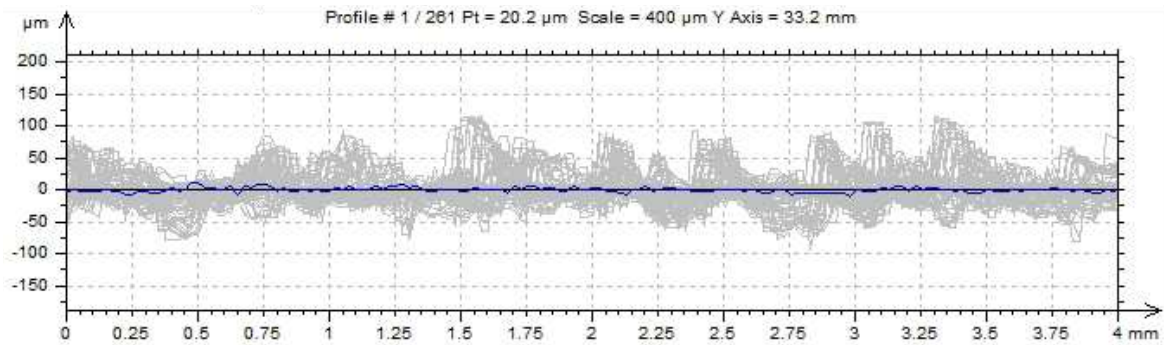
Obr. 87 Řez materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.



Obr. 88 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru



Obr. 89 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru s odfiltrovanou vlnitostí



Obr. 90 Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru

Tab. 49 Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru

Veličina	Jednotky	Aritmetický průměr	Střední odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Rp	[µm]	19,8	21,3	4,27	74,2
Rv	[µm]	13,4	12,2	4,39	51,5
Rz	[µm]	33,2	31,9	8,96	105
Rc	[µm]	22	23,2	4,97	78,2
Rt	[µm]	45,8	43,3	11,5	142
Ra	[µm]	6,38	6,62	1,8	23,6
Rq	[µm]	8,27	8,32	2,22	27,7
Rsk		0,461	1,43	-2,49	5,81
Rku		5,81	6,85	2,19	47

6.2.3 Popis grafů

Analýza drsnosti povrchu byla zpracována na základě měření drsnosti ploch jednotlivých vzorků obrobených na CO₂ a vláknovém laseru.

Bezkontaktní měření povrchů bylo snímáno kolmo na plochu řezu jednotlivých vzorků. Při vyhodnocování tloušťky 6 mm byla snímána plocha o velikosti 6 x 4 mm a u vzorků tloušťky 8 mm byla snímána plocha velikost 7,5 x 4 mm.

2D grafy znázorňují povrch měřeného vzorku, kde jsou barevně odlišeny výstupky a nerovnosti dané plochy. V grafech je vždy znázorněn povrch nefiltrovaný, což je povrch reálně změřený měřicím zařízením a povrch s odfiltrovanou vlnitostí. Profil s odfiltrovanou vlnitostí je získán z reálného profilu potlačením vlnitosti.

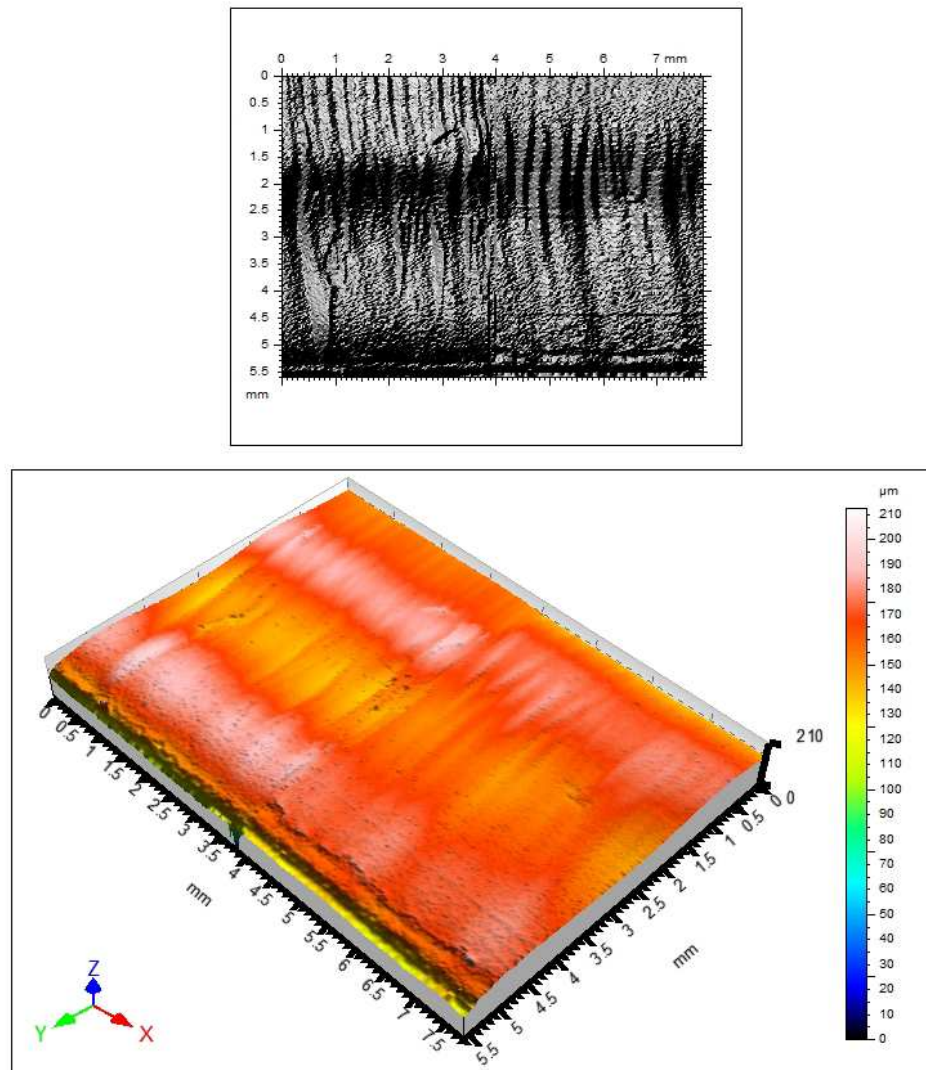
Další graf zobrazuje profil drsnosti povrchu vzorků. Jedná se o 2D zobrazení nasnímaného povrchu v řezu. Podle tloušťky měřeného vzorku byl proveden určitý počet měření. A z těchto výsledků pak byly hodnoty drsnosti zaznamenány do tabulky pod grafem.

Pro zjednodušení bude popsáno měření vzorku materiálu 11 375 tloušťky 6 mm obráběného na vláknovém laseru. Kde osa X odpovídá délce měření daného vzorku v milimetrech, osa Y pak odpovídá výškám naměřených nerovností na měřeném povrchu. Jednotky jsou uvedeny v μm , čára s hodnotou 0 se nazývá středová čára profilu. Z grafu (obr. 40.) lze vyčíst, že na tloušťce materiálu bylo provedeno 221 měření drsnosti. To znamená že tloušťka vzorku 6 mm byla rozdělena na 221 částí a na těchto částech byla měřena drsnost povrchu v délce 4 mm.

6.3 Porovnání jakostí řezu obrobeného povrchu materiálů řezaných na CO₂ a vláknovém laseru

V následující kapitole jsou k sobě přiloženy pro porovnání jakosti obráběného povrchu 3D modely obrobených povrchů jednotlivých materiálů a tlouštěk obráběných na CO₂ laseru a vláknovém laseru. V modelech je vždy z levé strany od 0 do 4 mm sken povrchu materiálu obrobeného na CO₂ laseru a od 4 mm do 8 mm je naskenovaný povrch materiálu obrobeného na vláknovém laseru. Osa X určuje směr řezu materiálu, osa Y udává hloubku řezu materiálu a osa Z jsou nerovnosti řezaného povrchu.

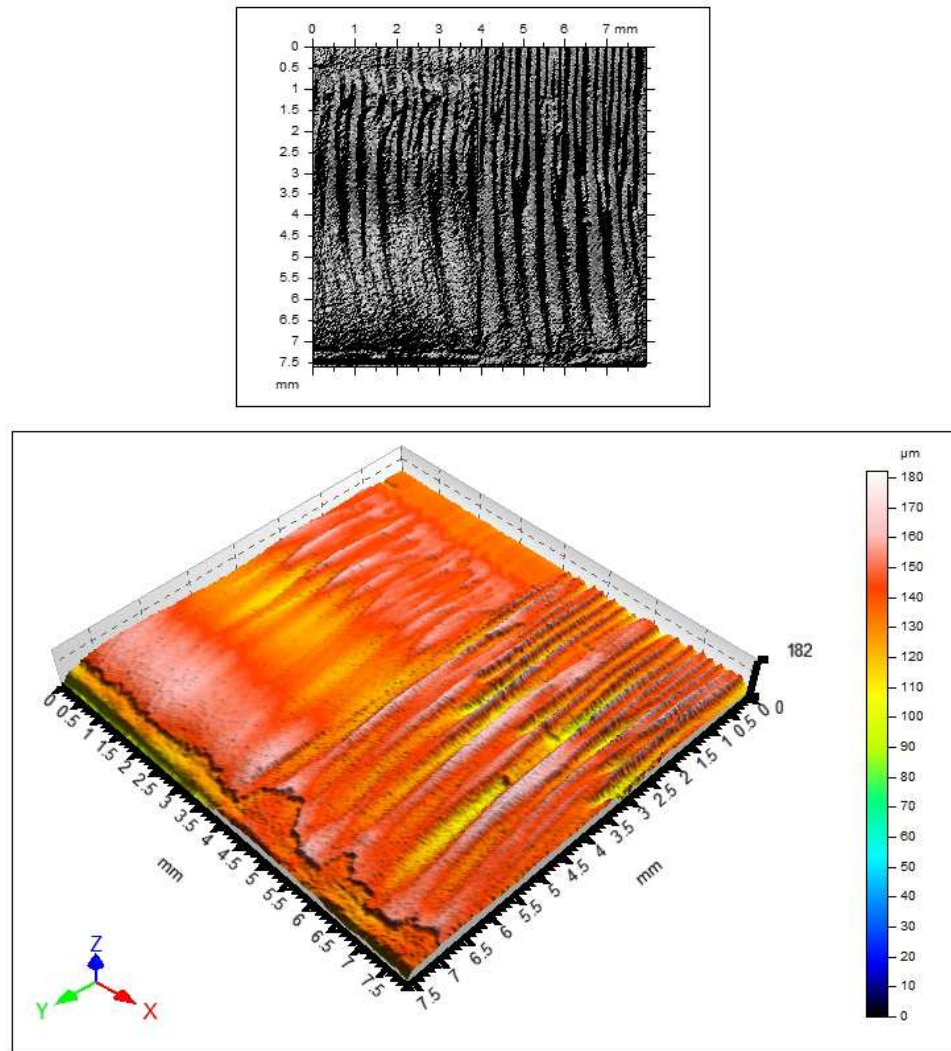
6.3.1 Porovnání řezu CO₂ a vláknového laseru- materiál 11 375



Obr. 91 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu 11 375 tloušťky 6 mm

V modelu je jasně viditelná podobnost řezaných ploch. Jakost povrchu obou technologií je u daného materiálu tloušťky 6 mm velmi podobná, hodnoty naměřené drsnosti obráběné plochy na vláknovém laseru je $R_a = 1,3 \mu\text{m}$ a na CO₂ laseru pak $R_a = 1,5$. Lepší hodnoty drsnosti u daných vzorků tedy vykazuje řez na vláknovém laseru.

Při tloušťce materiálu 6 mm jsou tedy obě technologie srovnatelné jakostí, ale je zde rozdíl v rychlosti opracování. Na CO₂ laseru je materiál obráběn řeznou rychlostí $2700 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a na vláknovém laseru je materiál obráběn řeznou rychlostí $2600 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Už tedy u tloušťky 6 mm při tavném řezání opracovává vláknový laser materiál pomaleji, než CO₂ laser.

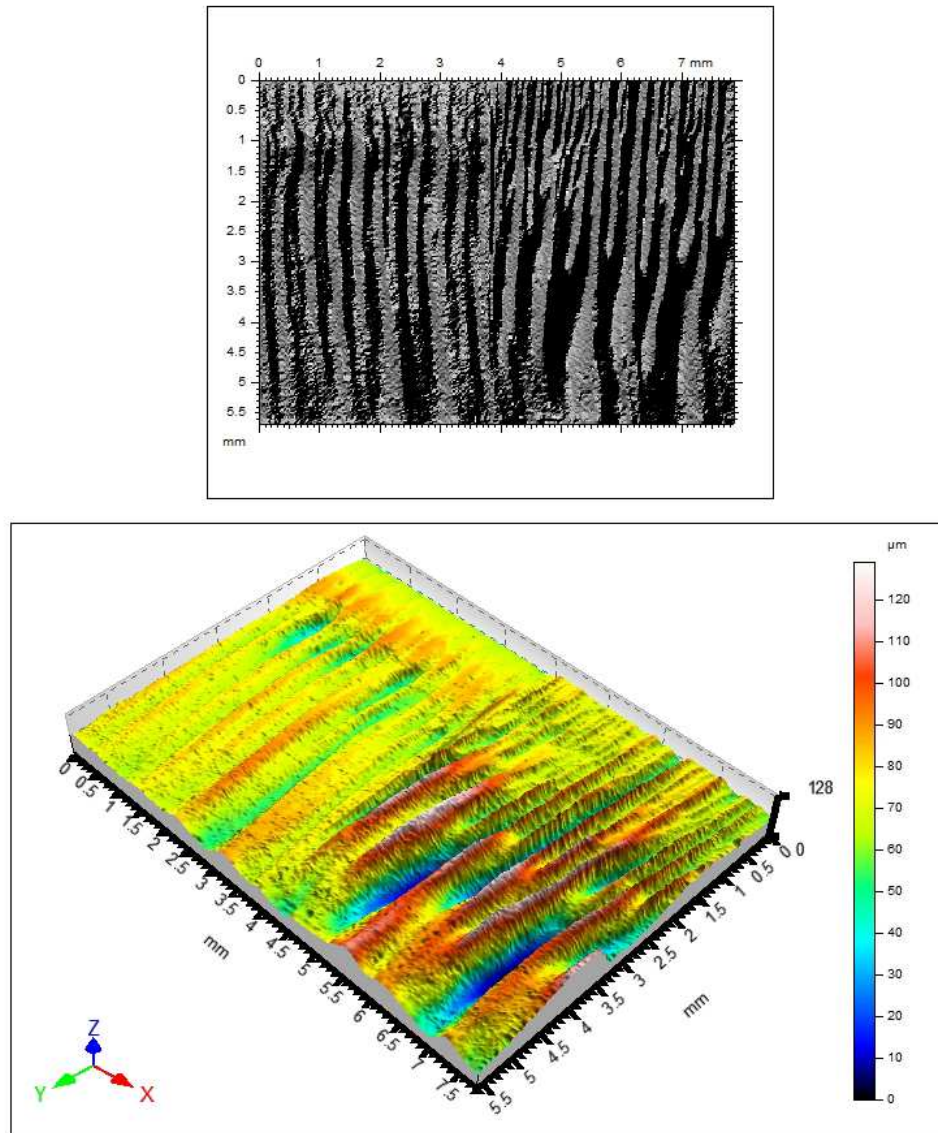


Obr. 92 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu 11 375 tloušťky 8 mm

U materiálu 11 375 tloušťky 8 mm jsou na ploše obráběné na vláknovém laseru znatelné stopy (rýhy) po laserovém paprsku. Naproti tomu opracování na CO₂ laseru je srovnatelné svou jakostí (jak lze vyčíst z grafů) s obrobeným povrchem materiálu 11 375 o tloušťce 6 mm. U tloušťky 8 mm materiálu 11 375 byly naměřeny hodnoty drsnosti obráběné plochy na vláknovém laseru $R_a = 7,2 \mu\text{m}$ a na CO₂ laseru $R_a = 2,3 \mu\text{m}$. Lepší hodnoty drsnosti u daných vzorků tedy vykazuje řez na CO₂ laseru.

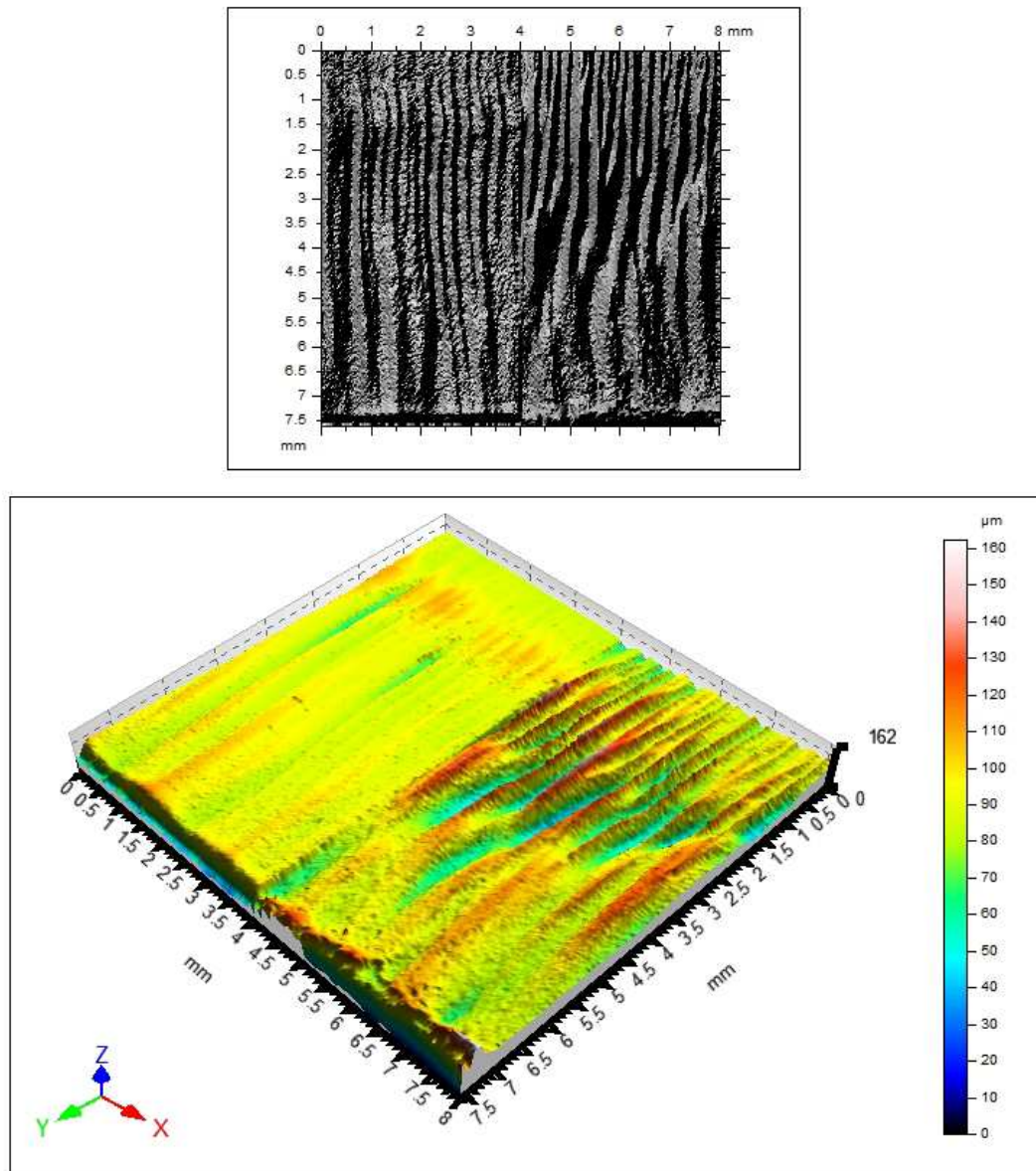
U obou technologiích lze pozorovat mírné okuje u spodní hrany materiálu. Při porovnání řezných rychlostí je opracování konstrukční oceli technologií CO₂ laseru znatelně rychlejší. Rychlost opracování materiálu 11 375 technologií CO₂ laseru je pro daný vzorek $2100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Při opracování technologií vláknového laseru je rychlost řezu $1800 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

6.3.2 Porovnání řezu CO₂ a vláknového laseru- materiál Hardox 450



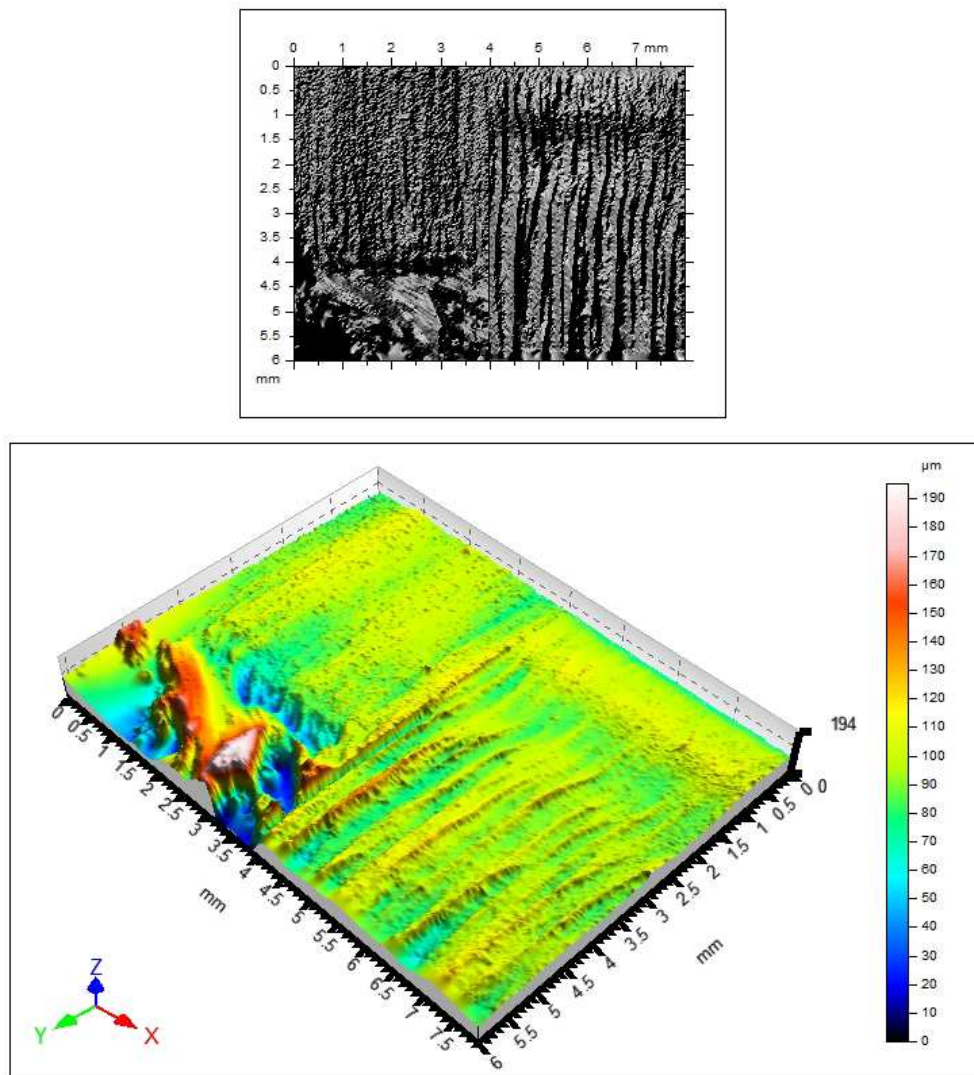
Obr. 93 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu Hardox 450 tloušťky 6 mm

U ořezavzdorného tvrdého materiálu tloušťky 6 mm jsou patrné stopy po laserovém paprsku u obou technologií. Tento materiál je tedy obtížněji opracovatelný i laserovým paprskem. Obrábění materiálu Hardox 450 na vláknovém laseru vykazovalo horší kvalitu z hlediska jakosti obroběného povrchu a také mnohem pomalejší opracování. U těchto vzorků byly naměřeny hodnoty drsnosti obráběné plochy na vláknovém laseru $R_a = 10,6 \mu\text{m}$ a na CO₂ laseru pak drsnost dosahuje hodnot $R_a = 3,9 \mu\text{m}$. Při opracování ořezavzdorného materiálu technologií CO₂ byla rychlost řezu $2500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Vzorek vypálen technologií vláknového laseru byl řezán rychlostí $1300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

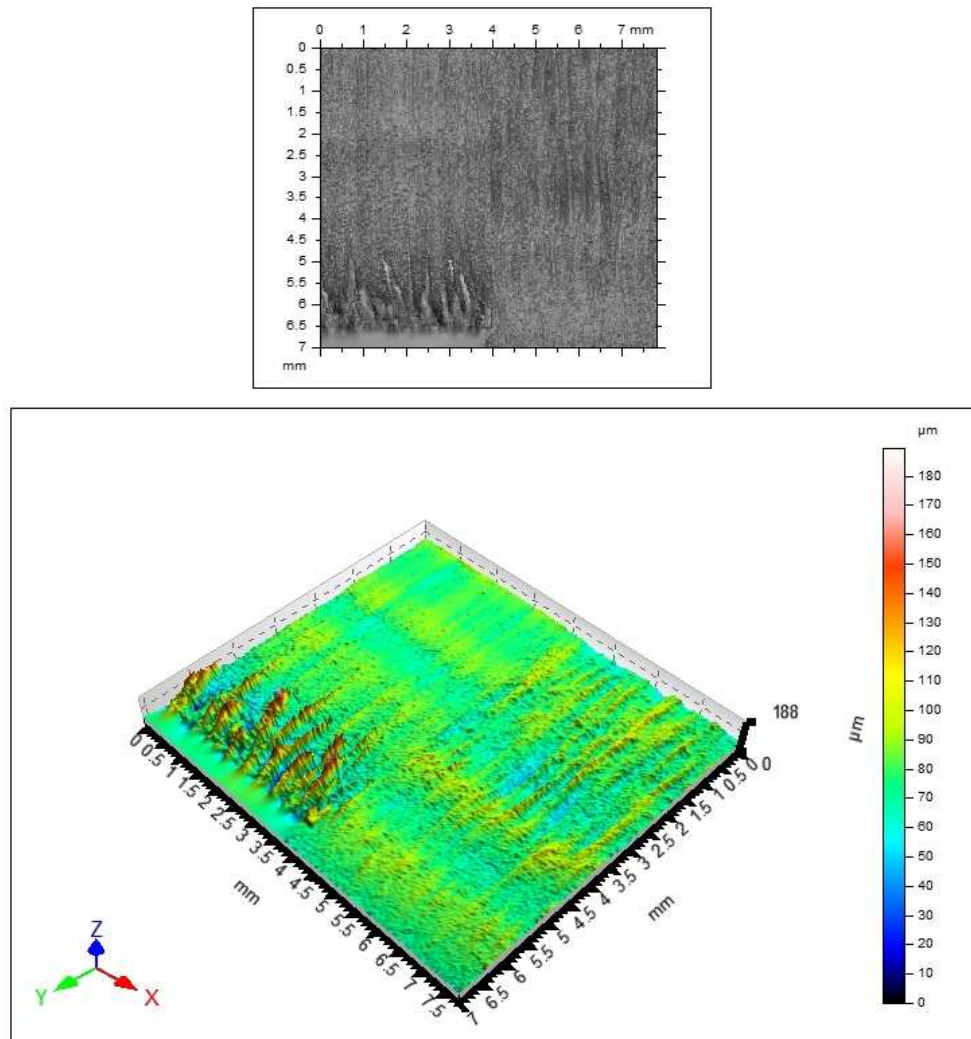


Obr. 94 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu Hardox 450 tloušťky 8 mm

Z modelu je patrné, že čím větší tloušťka otěruvzdorného materiálu, tím horší kvalita řezu u vláknového laseru. Při řezání materiálu Hardox 450 tloušťky 8 mm je opět jakost povrchu řezu vzorku obrobeného CO₂ laserem přibližně stejná jako u řezání téhož materiálu tloušťky 6 mm. Při obrábění na vláknovém laseru dochází k tvorbě hlubokých kráterů a zároveň na spodní straně materiálu zůstávají okuje. U vzorku obráběného vláknovým laserem byla naměřena drsnost $R_a = 8,9 \mu\text{m}$ a na CO₂ laseru $R_a = 2,8 \mu\text{m}$. Lepší hodnoty drsnosti u daných vzorků tedy vykazuje řez na CO₂ laseru. Rychlosti opracování jsou již značně rozdílné. Rychlost řezání vláknového laseru byla $900 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, CO₂ laser umožnil opracování rychlostí $1900 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

6.3.3 Porovnání řezu CO₂ a vláknového laseru- materiál 17240

Obr. 95 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu 17 240 tloušťky 6 mm



Obr. 96 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu 17 240 tloušťky 8 mm

U řezání nerezových ocelí se jedná o úplně odlišnou metodu řezání laserem než při řezání konstrukčních a otěruvzdorných materiálů. Nerezová ocel je obráběna metodou tavného řezání. Pro tuto metodu je do místa řezu přiváděn jako podpurný plyn dusík. Z modelů lze vyčíst podobnosti u obou tlouštěk. V horní části řezu (v místě průniku paprsku do materiálu) jsou jakosti řezaného povrchu materiálu podobné, ale při dalším postupu laseru do materiálu se při obrábění na CO₂ laseru tvoří u spodní hrany (u výstupu laseru z materiálu) otřep. Při obrábění na vláknovém laseru je jakost povrchu téměř stejná, jak při vstupu laserového paprsku do materiálu, tak při výstupu z něj. Drsnost naměřená při obrábění na vláknovém laseru dosahovala u tloušťky 6 mm hodnot $R_a = 4,5 \mu\text{m}$ a u tloušťky 8 mm $4,33 \mu\text{m}$. U obrábění na CO₂ laseru byly naměřeny hodnoty pro tloušťku 6 mm $R_a = 4,2 \mu\text{m}$ a tloušťku 8 mm $R_a = 6,38 \mu\text{m}$. Rychlosti obrábění se u materiálu 17 240 tloušťky 6 mm značně liší. Pro CO₂ laser byla rychlost obrábění $1100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, u vláknového byl materiál obráběn rychlostí $2100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Pro tloušťku 8 mm byl materiál

obráběn na CO₂ laseru rychlostí 800 mm.min⁻¹, na vláknovém laseru byla rychlost obrábění 1200 mm.min⁻¹.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou laserového obrábění ocelí.

Za tímto účelem byla zpracována literární studie, která souhrnně představuje jednotlivé metody spadající do oblastí nekonvenčních technologií. Nastiňuje jejich hlavní výhody i nevýhody a stručně popisuje základní principy nejběžněji používaných technologií. Hlavní pozornost je zaměřena na technologii laserového obrábění, kde jsou představeny základní fyzikální principy vzniku laserového svazku, jeho působení na materiál, také jsou zde uvedeny základní typy laserů a jejich rozdělení. V návaznosti na použité zařízení pro výrobu experimentálních vzorků je na závěr literární rešerše detailně popsána technologie CO₂ laseru a vláknového laseru FIBER.

V praktické části diplomové práce bylo provedeno experimentální obrábění na dvou odlišných laserových zařízeních s cílem porovnat získané výsledky. Pro porovnání jakosti povrchu řezaného materiálu byly vypáleny experimentální vzorky velikosti 50 x 40 mm ze třech materiálů o tloušťkách 6 a 8 mm, na zařízeních firmy MRB Sazovice, spol. s r.o., která využívají tyto dvě technologie vzniku a vedení laserového paprsku pro dělení materiálu. Jedná se o materiály, které jsou v praxi běžně používány: konstrukční ocel 11 375, nerezová ocel 17 240 a otěruvzdorný materiál HARDOX 450. Materiály byly obráběny na zařízení LT9 od výrobce BLM GROUP s technologií vláknového laseru a na zařízení Platino od výrobce Prima Power s technologií laseru CO₂. Pro porovnání jakosti vypálených vzorků, byly detailně zkoumány jejich řezné plochy, na kterých byla také změřena a porovnána drsnost povrchu.

Z naměřených hodnot drsností povrchu řezu je zřejmé, že obrábění materiálu metodou řezání plamenem za podpory řezného plynu kyslíku je na CO₂ laseru vhodné obrábět i větší tloušťky materiálu jak ocelí konstrukčních tak otěruvzdorných. Touto metodou řezání nedochází u CO₂ laseru s rostoucí tloušťkou k výraznému zhoršení drsnosti povrchu. Naopak u vláknového laseru dochází při řezání touto metodou s rostoucí tloušťkou také ke zhoršení kvality drsnosti povrchu. Z naměřených hodnot je možné vyvodit, že drsnost při metodě obrábění plamenem naměřena na ploše řezu u CO₂ laseru vykazuje lepší hodnoty, než při obrábění na vláknovém laseru.

Při vyhodnocení výsledků řezání nerezové oceli tavnou metodou vykazují lepší hodnoty naměřené drsnosti vzorky vypálené na vláknovém laseru. Při obrábění na CO₂ laseru je u strany, výstupu paprsku z materiálu značně zhoršená kvalita povrchu. Vzorky vypálené na

vláknovém laseru mají u obou tloušťek podobné drsnosti řezaného povrchu. Hodnoty se od sebe značně neliší. U CO₂ laseru není povrch nerezového materiálu obroben z hlediska drsnosti s takovou kvalitou jako u vláknového laseru. Z hlediska naměřené drsnosti povrchu řezané plochy je vhodnější obrábět nerezové materiály na vláknovém laseru.

Po porovnání jakosti vypálených vzorků nelze s určitostí tvrdit, kterou technologií je výhodnější kvalitně obrábět daný materiál. Dá se pouze konstatovat, že hlediska jakosti obrobeného povrchu, je obrábění na CO₂ laseru výhodnější pro obrábění metodou řezání plamenem. Při tomto obrábění vykazují vzorky vyšší kvalitu jakosti, než u vláknového laseru. Naopak vláknový laser dokáže obrábět nerezové materiály tavnou metodou s vyšší kvalitou řezu než laser plynový (viz. tab. 50).

Tab. 50. Porovnání naměřených hodnot Ra

Materiál	Drsnost Ra vzorku obrobeného na CO ₂ laseru [μm]	Drsnost Ra vzorku obrobeného na vláknovém laseru [μm]
11375 tloušťka 6 mm	1,5	1,3
11375 tloušťka 8 mm	2,3	7,2
Hardox 450 tloušťka 6 mm	3,9	10,6
Hardox 450 tloušťka 8 mm	2,8	8,9
17 240 tloušťka 6 mm	4,2	4,5
17 240 tloušťka 8 mm	6,38	4,33

Laserové řezání nelze použít pro výrobu velmi přesných součástí. Jedná se o obrábění za pomoci tepla a zároveň je zde fokusace nástroje (paprsku, což způsobuje podřezání obroběného materiálu). Přesnosti obou technologií dosahují pouze 0,1 mm. Taková přesnost je pro výrobu přesných strojírenských součástí nedostačující. Proto se těmito technologiemi vyrábí hlavně polotovary pro následné ohýbání nebo polotovary pro dodatečné obrábění třískové, u kterých je kladen důraz na jakost obrobeného povrchu, ale zároveň na ekonomickou náročnost výroby polotovarů.

Při porovnání řezání materiálu laserem je tedy také nutné klást důraz na ekonomické náklady, které jsou spojeny s pořízením a provozem laseru. Pořizovací náklady jsou nižší u CO₂ laseru, kde není cena zdroje laserového paprsku tak finančně nákladná jako u laserů vláknových. Pořizovací cena CO₂ laseru Platino pro plošné řezání byla 320 000 €. Naproti tomu pořizovací cena vláknového laseru LT9 byla 390 000 €.

Laser Platino má vyšší výkon zdroje laserového paprsku (4 kW), ale dokáže pálit tlusté plechy z konstrukční a ořezovací oceli vyšší řeznou rychlostí a kvalitněji (což snižuje náklady na výrobu dílců) než vláknový laser. Je tedy z ekonomického a zároveň z časového hlediska výhodnější pro dělení konstrukčních a ořezovacích materiálů metodou řezání plamenem. U řezání tavnou metodou tyto výhody mizí.

Vláknový laser LT9 má nižší výkon (3,4 kW) než CO₂ laser, ale obrábí menší rychlostí při využití metody řezání plamenem. Tedy metoda řezání plamenem je pro vláknový laser, z hlediska ekonomické a časové náročnosti na obrábění výrobků, méně vhodná (tedy obrábí za vyšší cenu). Pro nerezové materiály, je ale situace přesně opačná. Řezná rychlost je při obrábění metodou tavného řezání u vláknového laseru LT9 značně vyšší než u CO₂ laseru Platino. Vláknový laser je tedy z ekonomického a časového hlediska vhodnější pro obrábění metodou tavného řezání.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó.: *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4
- [2] KOČMAN, Karel.: *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2
- [3] *Nekonvenční metody obrábění*. [online]. 2008, č. 5 [cit. 2016-1-6]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com>
- [4] Přednášky doc. Ing. Libuše Sýkorová Ph.D.
- [5] MORÁVEK R.: *Nekonvenční metody obrábění* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1999, ISBN 80-7082-518-9
- [6] *Elektrochemické a chemické metody obrábění*. [online]. 2015, č. 5 [cit. 2016-1-6]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz>
- [7] *Analýza nekonvenčních technologií se zaměřením na řezání plasmou a laserem*. Zlín, 2012. Diplomová práce. UTB. Vedoucí práce Sýkorová Libuše, doc. Ing. Ph.D.
- [8] *Hlavní typy laseru používaných v průmyslu*. [online]. 2013, č. 5 [cit. 2016-1-6]. Dostupné z: http://www.lao.cz/laoinfo/serial2011/hlavni_prumyslove_lasery.php
- [9] Lasery info learning. *Leonardo Technologi* [online]. 2013 [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning>
- [10] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserová technologie v praxi* [online]. 2010, , 17 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [11] Šmíd J.: *Lasery pro průmysl* (2008) MM Průmyslové spektrum 7 [online], <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl>.
- [12] Ing. Jaroslav Řasa, CSc., Ing. Zuzana Kerečaninová, Ph.D. *Nekonvenční metody obrábění* (2008) MM Průmyslové spektrum -5 [online], <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
- [13] <http://www.gspzborovice.cz/download/download/platino.pdf>

- [12] Ing. Jaroslav Řasa, CSc., Ing. Zuzana Kerečaninová, Ph.D.: (2008) MM Průmyslové spektrum 7 [online]

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Ar	Argon.
H	Vodík.
He	Helium.
E ₁	Nižší energetická hladina.
E ₂	Vyšší energetická hladina
h	Planckova konstanta = $6,626 \cdot 10^{-34}$ [J.s].
ν	Frekvence uvolněného vlnění.
CO ₂	Oxid uhličitý.
Fe	Železo
R _v	Největší hloubka prohlubně profilu na základní délce
R _p	Největší výška výstupku profilu na základní délce
R _z	Největší výška profilu v rozsahu základní délky
R _a	Průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu
R _t	Celková výška povrchu v rozsahu vyhodnocované délky
R _{ms}	Aritmetický průměr šířek profilu v rozsahu základní délky
R _c	Materiálový podíl drsnosti profilu
R _q	Střední kvadratická hodnota drsnosti

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Deformace vzniklé při třískovém obrábění [4].....</i>	14
<i>Obr. 2 Dělení materiálu plazmovým hořákem [3]</i>	14
<i>Obr. 3 Elektrochemické obrábění [6]</i>	17
<i>Obr. 4 Elektroerozivní obrábění [6]</i>	19
<i>Obr. 5 Elektroerozivní drátové řezání [6]</i>	20
<i>Obr. 6 Obrábění svazkem elektronů [4].....</i>	21
<i>Obr. 7 Obrábění iontovým paprskem [4].....</i>	21
<i>Obr. 8 Obrábění ultrazvukem [3]</i>	22
<i>Obr. 9 Obrábění vodním paprskem s abrazivem</i>	23
<i>Obr. 10 Obrábění plazmou [7]</i>	23
<i>Obr. 11 Princip laseru [8]</i>	24
<i>Obr. 12 Princip stimulované emise [4].....</i>	25
<i>Obr. 13 Optický rezonátor[4]</i>	26
<i>Obr. 14 Interakce materiálu a paprsku [9].....</i>	28
<i>Obr. 15. Princip pevnolátkového laseru s krypronovou výbojkou [9].....</i>	29
<i>Obr. 16. Princip zvýšení výkonu součástkou Q-switch [9]</i>	30
<i>Obr. 17. polovodičový laser [10].....</i>	32
<i>Obr. 18. Princip vláknového laseru [9]</i>	33
<i>Obr. 19. Optické vlákno [9]</i>	33
<i>Obr. 20. Princip rezonátoru vláknového laseru [9].....</i>	34
<i>Obr. 21. Schéma rezonátoru CO2 laseru [9].....</i>	36
<i>Obr. 22. Vychylování paprsku PEN TYPE. 1- laserový zdroj, 2- beam expander, optika rozšiřující paprsek, 3 a 4 - galvo motory pro X a Y osu se zrcátky směřující paprsek na 5 - výstupní optiku laseru [10]</i>	37
<i>Obr. 23. Typy rezonátorů [10].....</i>	39
<i>Obr. 24. Soustružení laserem [12].....</i>	41
<i>Obr. 25. Vrtání paprskem laseru [7].....</i>	41
<i>Obr. 26. Prim Platino CO₂ Laser</i>	47
<i>Obr. 27. Řezná hlava a tryska Platino [13]</i>	47
<i>Obr. 28. BLM Group Fiber Laser LT9</i>	48
<i>Obr. 29. Univerzální mikroskop Carl Zeiss</i>	49
<i>Obr. 30. Drsnost povrchu Ra.....</i>	58

<i>Obr. 31 Řez materiálu 11 375, tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru se řeznými parametry dodanými výrobcem.</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 32 Řez materiálu 11 375, tloušťka 8 mm, obráběného na vláknovém laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 33 Řez materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 34 Řez materiálu HARDOX 450, tloušťka 8 mm, obráběného na vláknovém laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 35 Řez materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru s řeznými parametry i dodanými výrobcem.</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 36 Řez materiálu 17 240, tloušťka 8 mm, obráběného na vláknovém laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 37 Řez materiálu 11375 tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 38 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375, tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 39 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 40 Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 41 Řez materiálu 11375 tloušťka 8 mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 42 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 43 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 44 Graf naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 45 Řez materiálu Hardox 450 tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 46 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 47 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>71</i>

<i>Obr. 48 Graf naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu HARDOX 450 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 49 Řez materiálu Hardox 450 tloušťka 8mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 50 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 51 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 52 Graf naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu Hardox 450 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 53 Řez materiálu 17 240 tloušťka 6 mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 54 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17 240 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 55 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17240 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 56 Graf naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 17 240 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 57 Řez materiálu 17 240 tloušťka 8 mm, obráběného na vláknovém laseru s optimalizovanými řeznými parametry.</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 58 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17240 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 59 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17240 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 60 Graf naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 17 240 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 61 Řez materiálu 11 325 tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 62 Řez materiálu 11 375 tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 63 Řez materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 64 Řez materiálu Hardox 450, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.</i>	<i>83</i>

<i>Obr. 65 Řez materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 66 Řez materiálu 17 240, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru s řeznými parametry dodanými výrobcem.</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 67 Řez materiálu 11375, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 68 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 69 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 70 Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 71 Řez materiálu 11375, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 72 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 73 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 74 Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 75 Řez materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 76 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 77 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 78 Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 79 Řez materiálu Hardox 450, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 80 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 81 Drsnost obrobeného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>94</i>

<i>Obr. 82 Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 83 Řez materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 84 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 85 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 86 Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 87 Řez materiálu 17 240, tloušťka 6 mm, obráběného na CO₂ laseru optimalizovanými parametry.</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 88 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 89 Drsnost obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 8 mm, obráběného na CO₂ laseru s odfiltrovanou vlnitostí.....</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 90 Graf naměřené drsnosti obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 91 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu 11 375 tloušťky 6 mm.....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 92 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu 11 375 tloušťky 8 mm.....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 93 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu Hardox 450 tloušťky 6 mm</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 94 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu Hardox 450 tloušťky 8 mm</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 95 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu 17 240 tloušťky 6 mm.....</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 96 Porovnání naskenovaných povrchů řezů materiálu 17 240 tloušťky 8 mm.....</i>	<i>107</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Porovnání nekonvenčních metod s třískovým obráběním [5].....</i>	15
<i>Tab. 2. Chemické složení oceli 17 240 tloušťka 6 mm.....</i>	51
<i>Tab. 3. Základní pevnostní charakteristiky oceli 17 240 tloušťka 6 mm</i>	51
<i>Tab. 4. Chemické složení oceli 17 240 tloušťka 8 mm.....</i>	52
<i>Tab. 5. Základní pevnostní charakteristiky oceli 17 240 tloušťka 8 mm</i>	52
<i>Tab. 6. Chemické složení oceli 11 375 tloušťka 6 mm.....</i>	53
<i>Tab. 7. Základní pevnostní charakteristiky oceli 11 375 tloušťka 6 mm</i>	54
<i>Tab. 8. Chemické složení oceli 11 375 tloušťka 8 mm.....</i>	54
<i>Tab. 9. Základní pevnostní charakteristiky oceli 11 375 tloušťka 8 mm</i>	55
<i>Tab. 10 Chemické složení oceli Hardox 450 tloušťka 6 mm.....</i>	56
<i>Tab. 11 Základní pevnostní charakteristiky oceli Hardox 450 tloušťka 6 mm.....</i>	56
<i>Tab. 12 Chemické složení oceli Hardox 450 tloušťka 8 mm.....</i>	57
<i>Tab. 13. Základní pevnostní charakteristiky oceli Hardox 450 tloušťka 8 mm.....</i>	57
<i>Tab. 14. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál 11 375 tloušťka 6 mm</i>	59
<i>Tab. 15. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál 11 375 tloušťka 8 mm</i>	59
<i>Tab. 16. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál HARDOX 450 tloušťka 6 mm</i>	60
<i>Tab. 17. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál Hardox 450 tloušťka 8 mm</i>	61
<i>Tab. 18. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál 17 240 tloušťka 6 mm</i>	62
<i>Tab. 19. Řezné parametry vláknového laseru dodané výrobcem pro materiál 17 240 tloušťka 8 mm</i>	63
<i>Tab. 20. Optimalizované řezné parametry pro materiál 11 375 tloušťka 6 mm vláknového laseru.....</i>	64
<i>Tab. 21 Hodnoty naměřených drsností povrchu materiálu 11 375 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru.....</i>	67
<i>Tab. 22. Optimalizované řezné parametry pro materiál 11 375 tloušťka 8 mm vláknového laseru.....</i>	67

Tab. 23	Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru	69
Tab. 24.	Optimalizované řezné parametry pro materiál Hardox 450 tloušťka 6 mm vláknového laseru	69
Tab. 25	Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu Hardox 450 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru	72
Tab. 26.	Optimalizované řezné parametry pro materiál Hardox 450 tloušťka 8 mm vláknového laseru	72
Tab. 27	Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu HARDOX 450 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru	74
Tab. 28.	Optimalizované řezné parametry pro materiál 17 240 tloušťka 6 mm vláknového laseru	74
Tab. 29	Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 17 240 tloušťka 6 mm obráběného na vláknovém laseru	77
Tab. 30.	Optimalizované řezné parametry pro materiál 17 240 tloušťka 8 mm vláknového laseru	77
Tab. 31	Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 17 240 tloušťka 8 mm obráběného na vláknovém laseru	79
Tab. 32.	Řezné podmínky CO ₂ laseru dodané výrobcem pro materiál 11 375 tloušťka 6 mm	79
Tab. 33.	Řezné podmínky CO ₂ laseru dodané výrobcem pro materiál 11 375 tloušťka 8 mm	80
Tab. 34.	Řezné podmínky CO ₂ laseru dodané výrobcem pro materiál HARDOX 450 tloušťka 6 mm	81
Tab. 35.	Řezné podmínky CO ₂ laseru dodané výrobcem pro materiál Hardox 450 tloušťka 8mm	82
Tab. 36.	Řezné podmínky dodané výrobcem pro materiál 17 240 tloušťka 6 mm CO ₂ laseru	83
Tab. 37.	Řezné podmínky dodané výrobcem pro materiál 17 240 tloušťka 8 mm CO ₂ laseru	84
Tab. 38.	Optimalizované řezné parametry pro materiál 11 375 tloušťka 6 mm CO ₂ laseru	85
Tab. 39	Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 6 mm obráběného na CO ₂ laseru	88

Tab. 40. <i>Optimalizované řezné parametry pro materiál 11 375 tloušťka 8 mm CO₂ laseru</i>	88
Tab. 41 <i>Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 11 375 tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	90
Tab. 42. <i>Optimalizované řezné parametry pro materiál Hardox 450 tloušťka 6 mm CO₂ laseru</i>	90
Tab. 43 <i>Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	93
Tab. 44. <i>Optimalizované řezné parametry pro materiál Hardox 450 tloušťka 8 mm CO₂ laseru</i>	93
Tab. 45 <i>Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu Hardox 450, tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	95
Tab. 46. <i>Optimalizované řezné parametry pro materiál 17 240 tloušťka 6mm CO₂ laseru</i>	95
Tab. 47 <i>Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 6 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	98
Tab. 48. <i>Optimalizované řezné parametry pro materiál 17 240 tloušťka 8 mm CO₂ laseru</i>	98
Tab. 49 <i>Hodnoty naměřených drsností obrobeného povrchu materiálu 17 240, tloušťka 8 mm obráběného na CO₂ laseru</i>	100
Tab. 50. <i>Porovnání naměřených hodnot Ra</i>	110