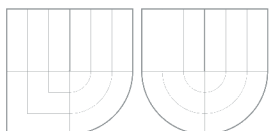


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SOUVISLOST VAD ŘEZU S ŘEZNÝMI PARAMETRY PŘI LASEROVÉM ŘEZÁNÍ

CONNECTION OF MISTAKES CUT WITH CUTTING CHARACTERISTIC AT
LASER CUTTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN ŠŤASTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph. D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Šťastný

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Souvislost vad řezu s řeznými parametry při laserovém řezání

v anglickém jazyce:

Connection of mistakes cut with cutting characteristics at laser cutting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě vzorků vytvořených metodou dělení laserem při variaci řezných parametrů určit oblast, kdy nedochází k náhodné a skokové změně drsnosti řezné hrany. Vzorky budou řezány z uhlíkové konstrukční oceli síly 20 mm. Variace parametrů budou prováděny s důrazem na polohu ohniska zaostřeného laserového svazku.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Rozbor technologických možností metody dělení materiálů laserem.

Rozbor použitých vzorků materiálů, vliv vneseného tepla a polohy ohniska na vznik řezných hran s nadměrně zvýšenou drsností.

Vyhodnocení vzorků, analýza a doporučení vhodných řezných parametrů.

Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Závěr.

Seznam odborné literatury:

BARCAL, Jaroslav. Nekonvenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT, Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie, Košice: Vienala, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 2. vydání Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 18.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Projekt se zabývá v první části teoretickým rozбором technologických možností metody dělení materiálu laserem, principem a funkcí laseru, rozdělení jednotlivých typů laserů, vlastnostmi laserového paprsku, laserovým řezáním, vadami řezu apod.

Experimentální část je zaměřena na rozbor použitých strojů a zařízení, nalezení optimálních řezných parametrů při laserovém řezání, vyhodnocení vzorků a následně rozboru problematiky vzniku skokových změn a zhodnocení dalších možností optimalizace řezu.

Klíčová slova

laserové řezání, ocel RAEX 250, vady řezů, skoková změna, parametry řezu

ABSTRACT

The project in first part deals with theoretical analysis of technological possibilities of method of dividing materials with laser, principal and function of laser, division of different types of lasers, properties of laser ray, laser cutting, cut defects etc.

Experimental part is focused on analysis of used machines and equipment, finding of optimal cutting parameters during laser cutting, evaluation of samples and then analysis of problem with generation of step changes and analysis of other possibilities for optimizing of the cut.

Key words

laser cutting, steel RAEX 250, cut defects, step change, cut parameters

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTASTNÝ, Jan. *Souvislost vad řezu s řeznými parametry při laserovém řezání*. Brno, 2012. 66 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Karel OSÍČKA, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Souvislost vad řezu s řeznými parametry při laserovém řezání** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

18.5.2012

Datum

Bc. Jan Šťastný

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D.za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval za odborné konzultace a vstřícnost RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D..Rád bych také poděkoval firmě Dendera a.s. se sídlem v Kanicích za poskytnuté materiály a provedení experimentu.

V neposlední řadě děkuji mé rodině a přátelům za jejich podporu v průběhu celého studia.

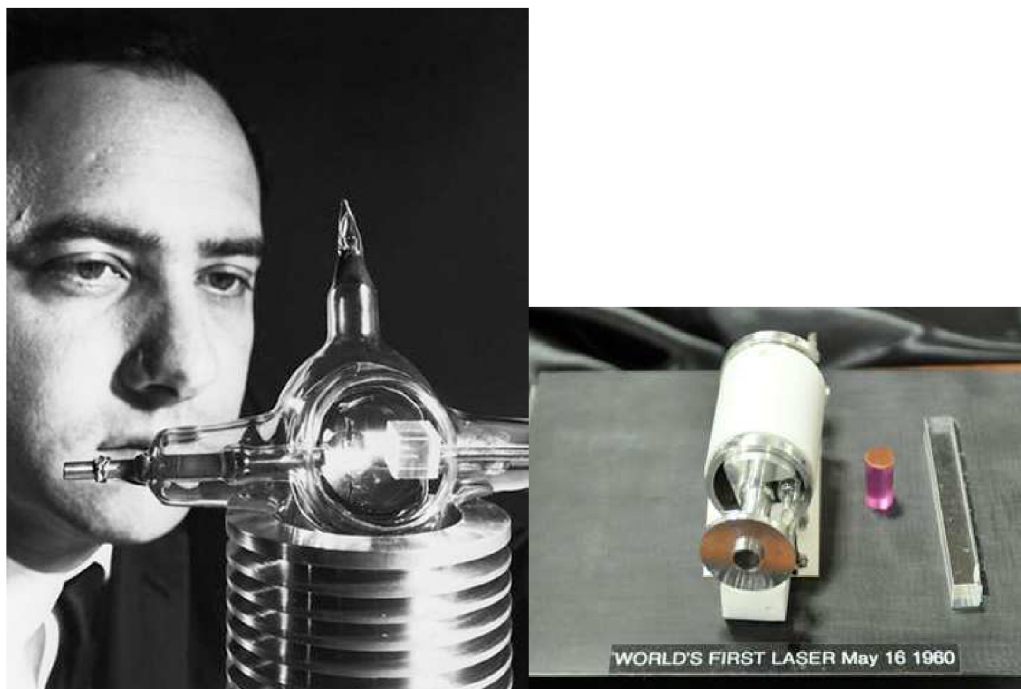
OBSAH

ABSTRAKT	4
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 Problematika laseru	10
1.1 Fyzikální princip laseru	10
1.1.1 Interakce fotonu a elektronu	10
1.1.2 Metastabilní hladina	11
1.1.3 Inverze populace	11
1.2 Rezonátor	12
1.3 Zdroj záření	12
1.4 Konstrukce řezací hlavy	13
1.5 Laserový paprsek a jeho vlastnosti	13
1.6 Základní rozdělení laserů	16
1.7 Typy průmyslových laserů	18
1.7.1 CO ₂ laser	18
1.7.2 Nd:YAG laser	19
1.7.3 Vláknový laser:	20
1.7.4 Polovodičový laser:	21
2 Využití laserů	22
2.1 Řezání laserem	23
2.1.1 Tavné řezání:	24
2.1.2 Oxidační řezání:	24
2.1.3 Sublimační řezání:	25
2.1.4 Řezání s podporou vzduchu:	25
2.2 Výhody a nevýhody laserového řezání	25
2.3 Parametry laserového záření použitého pro řezání	26
2.4 Svařování laserem	29
2.5 Tepelné zpracování pomocí laserového paprsku	30
2.6 Další možnosti využití laseru	30
2.7 Vady při řezání laserem	30
2.7.1 Poloha ohniska a jeho vliv na jakost řezné plochy	33
2.7.2 Výkon laserového paprsku a jeho vliv na jakost řezné plochy	33

2.7.3 Řezná rychlost a její vliv na jakost řezné plochy.....	33
3 Použité zařízení	34
3.1 Použitý Laser	34
3.2 Drsnoměr MarSurf M 300	35
4 Použitý materiál	36
5 Hledání optimálních řezných parametrů	37
5.1 Rozdělení vzorků	37
5.2 Nalezení optimálních parametrů při laserovém řezání oceli RAEX 250.....	38
5.3 Vyhodnocení jakostí řezných ploch.....	51
5.4 Řezné parametry	52
5.5 Vyhodnocení jakosti u vzorků 1, 2 a 3.	52
5.6 Vyhodnocení jakosti u vzorků 4, 5 a 6.	53
5.7 Vyhodnocení jakosti u vzorků 7, 8 a 9.	54
5.8 Vyhodnocení jakosti u vzorků 10, 11 a 12.	54
6 Technicko-ekonomické vyhodnocení	59
7 DISKUZE	60
7.1 Návrhy pokračování řešení	60
8 ZÁVĚR	61
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	62
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	65

ÚVOD [1], [2], [3]

LASER, což je zkratka z anglického **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, (tzn. zesilování světla stimulovanou emisí záření), byl fyzikálně popsán Albertem Einsteinem už v roce 1917, ovšem až o dlouhých 43 let později v roce 1960 byl Theodorem H. Maimanem předveden první funkční model, viz obr.1. Jako aktivní prostředí v tomto laseru byl použit rubínový krystal a do něj byly vpouštěny světelné záblesky. Laser se ihned po tomto objevu začal mohutně rozvíjet a našel mnoho využití v různých odvětvích, ať už ve vědě, medicíně, průmyslu, chemii, výpočetní techniky, ale také v obyčejném životě. Jako důkaz rozvoje lze uvést, že už po pouhém roce se laser používal k léčení kožních onemocnění a očních vad. Proto zřejmě nikoho nepřekvapí, že v roce 1964 byli Charles Townes, Nikolaj Basov a Alexandr Prochorov oceněni Nobelovou cenou za fyziku „za zásadní výzkum v oboru kvantové elektroniky, který vedl ke konstrukci oscilátorů a zesilovačů založených na principu maserů a laserů“.



Obr.1 První funkční model laseru [4]

1 PROBLEMATIKA LASERU [1], [6]

Laser je složité zařízení, které jakožto optický zdroj elektromagnetického záření vyzářuje světlo, které má od ostatních zdrojů záření specifické vlastnosti. Vyzářené světlo je monochromatické, koherentní a vychází z laseru v podobě úzkého paprsku.

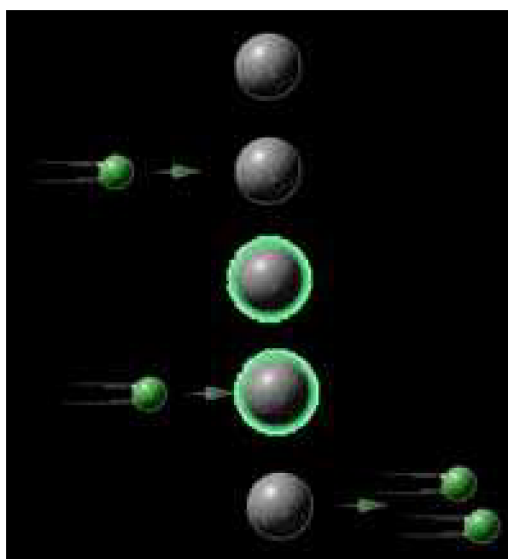
Hlavní výhodou takového paprsku je vysoké množství energie koncentrované díky optické soustavě laseru na malou plochu. Tento fakt měl za následek rozšíření laseru do mnoha dnešních odvětví, ať už je to průmysl, medicína, vesmírný výzkum, atd.

1.1 Fyzikální princip laseru

1.1.1 Interakce fotonu a elektronu [6]

Abychom pochopili složitou problematiku laseru, musíme se podívat až do nitra atomů. Pokud do elektronu narazí foton, předá mu svou energii a elektron excituje (přesune se) na vyšší energetickou hladinu. Podmínkou je, že foton musí mít právě takovou energetickou hladinu, kterou potřebuje elektron k dosažení vyšší energetické hodnoty. Foton zanikne. Elektron ovšem během krátké doby (řádově 10^{-8} s) vyzáří foton a vrátí se zpět na základní energetickou hladinu. Tento foton je vyzářen nahodilým směrem.

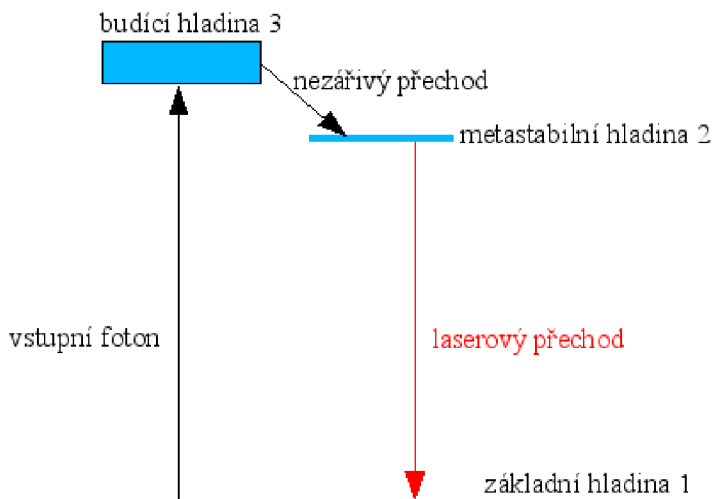
Pokud uvážíme, že do elektronu narazí první foton a elektron excituje na vyšší energetickou hladinu a následně do elektronu narazí druhý foton dříve, než se stihne elektron vrátit na základní energetickou hladinu, vyrazí první foton, který letí ve směru druhého fotonu a vrátí elektron na základní energetickou hladinu (obr. 2). Následně se dva fotony se stejnou vlnovou délkou, které letí stejným směrem, spojí a mají stejný vlnový charakter. Při tomto vlnovém spojení vzniká jediná vlna s dvojnásobnou amplitudou a tudíž dvojnásobně větší energií.



Obr. 2 Interakce fotonu a elektronu [6]

1.1.2 Metastabilní hladina [6]

Paprsek laseru se tvoří v aktivním prostředí. Toto prostředí musí obsahovat prvky, jež jsou schopny vytvořit metastabilní hladinu. Princip nárazu fotonu do elektronu zůstává stejný s tím rozdílem, že elektron vydrží na metastabilní hladině řádově 10^6 x déle, což nám zajišťuje dostatečnou časovou rezervu pro náraz druhého fotonu a následné spojení obou vyzářených fotonů (viz obr. 3).



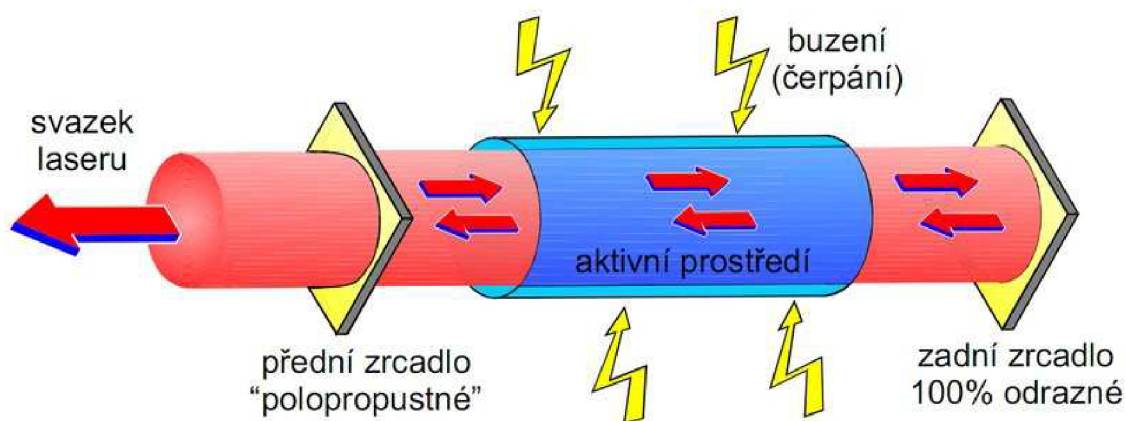
Obr. 3 Metastabilní hladina [9]

1.1.3 Inverze populace [6]

Pokud je na základní hladině méně elektronů atomu než na metastabilní hladině, mluvíme o inverzi populace. Fotony, neustále dodávané zdrojem, excitují elektrony na metastabilní hladinu a ty následně čekají na stimulaci od fotonu. Spuštění reakce proběhne díky obyčejnému světlu, to obsahuje celé spektrum vlnových délek světla a tudíž i potřebný stimulující foton. Po příletu stimulujícího fotonu všechny elektrony vypustí foton a klesnou na základní hladinu. Tyto vyzářené fotony se spojí v jedinou vlnu s mnohokrát větší amplitudou. Tento jev se nazývá stimulovaná emise záření. Problémem zůstává směr vlny, který je totožný se směrem pohybu stimulujícího fotonu. Tento směr ovšem nemusí být totožný s námi požadovaným směrem paprsku. Tohle vše probíhalo v jednom atomu, pokud uvažujeme fakt, že v aktivním prostředí se jich nachází mnohonásobně více, vzniká nám prostředí plné vyzářených fotonů, které narážejí na další a další elektrony na metastabilní hladině a dochází tak k mnohonásobnému zesilování fotonů a zesilování světla. Nyní je zapotřebí usměrnit zesílené světlo tak, aby bylo totožné s požadovaným směrem paprsku. Tento problém vyřeší rezonátor.

1.2 Rezonátor [6]

Rezonátor (viz obr. 4) je poměrně jednoduché zařízení skládající se ze dvou zrcadel, z nichž jedno je nepropustné a druhé polopropustné, umístěných v optické, většinou válcové, dutině. V dutině mezi zrcadly, která jsou navzájem rovnoběžná, se nachází aktivní prostředí a v něm probíhá stimulovaná emise záření. Vzhledem k velkému množství fotonů a jejich nahodilému pohybu se některé z nich začnou pohybovat ve směru kolmém na obě zrcadla a začnou se zesilovat ve větší a větší vlny. To je umožněno právě díky metastabilní hladině elektronů, které vydrží na této hladině, dokud do nich nenarazí nějaký z vyzařovaných fotonů. Ostatní fotony, které nelétají ve směru kolmém na zrcadla, vyletí z prostoru mezi nimi nebo jsou strhnuty právě fotony létající v kolmém směru. Postupem času nám fotony letící nechtěným směrem buď vymizí úplně nebo téměř úplně. Jakmile se foton zesílí na určitou hladinu, je polopropustným zrcadlem vypuštěn ven a tím vzniká požadovaný paprsek. Ten je koherentní a monochromatický.



Obr. 4 Rezonátor [11]

1.3 Zdroj záření [6]

Zdroje záření jsou zařízení, ve kterých dochází k přeměně různých druhů energií na energii elektromagnetického záření. Tato energie slouží k přesunu elektronů v aktivním prostředí z nižší energetické hladiny na vyšší.

Zdroje mohou být přirozené nebo umělé.

Přirozené zdroje záření:

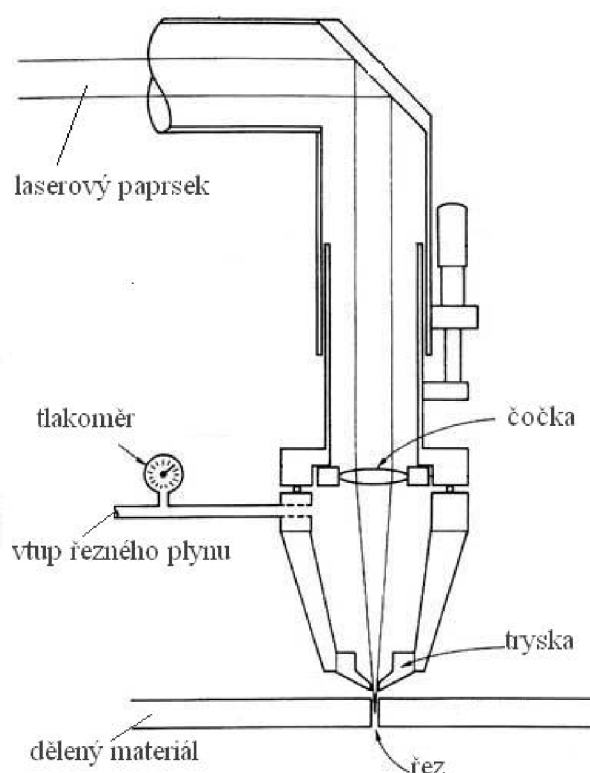
- slunce,
- hvězdy,
- luminiscenční objekty.

Umělé zdroje:

- tepelné (plamen, žárovka),
- luminiscenční (luminiscenční diody).

1.4 Konstrukce řezací hlavy [19], [25]

Laserový paprsek je do řezací hlavy (viz obr. 5) přiváděn optickou soustavou a prochází čočkou. Čočky musí být transparentní pro danou vlnovou délku příslušného laserového paprsku. V případě nesplnění této podmínky dojde k absorpci laserového paprsku a ohřívání čočky. V nejhorším případě, kdy teplotní napětí překročí určitou mez, dojde ke zničení čočky. Při spálení čočky se uvolní látky, které jsou velice jedovaté a škodlivé lidskému zdraví. Chlazení se provádí buď přímo pomocí asistenčního řezného plynu nebo pomocí vodního okruhu.



Obr. 5 Konstrukce řezací hlavy [19]

1.5 Laserový paprsek a jeho vlastnosti [1], [5], [17], [18], [26], [27]

Laserový paprsek se vyznačuje specifickými fyzikálními parametry, bez kterých by laser nemohl správně pracovat. Jsou to koherentnost, monochromaticnost a směrovost.

Koherentnost

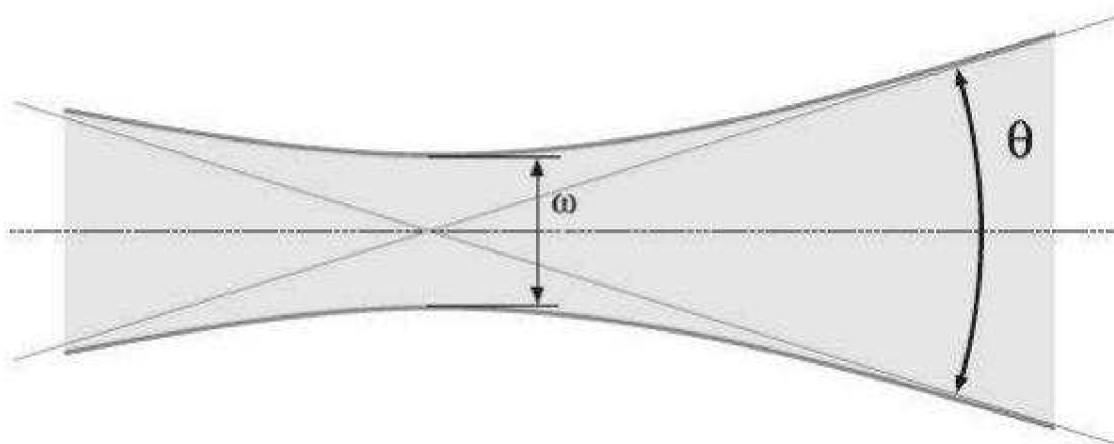
Koherentní světlo se skládá ze světel, jejichž vlnová délka a fáze je v určitém místě a čase stejná. Běžné světelné zdroje vyzařují nekoherentní světlo.

Monochromaticnost

Důležitá vlastnost laserového paprsku, ten je tvořen fotony o stejné vlnové délce. Dnešní generátory jsou schopny generovat tento paprsek s minimálními odchylkami. Světlo je jednobarevné.

Směrovost

Směrovost nám vzniká na výstupu z polopropustného zrcadla a podmínkou je koherentnost na ploše větší, než je vlnová délka záření. Směrovost se dá popsat prostorovým úhlem dle vztahu (1), který je v praxi označován jako rovinný úhel divergence paprsku.



Obr. 6 Rovinný úhel divergence paprsku [18]

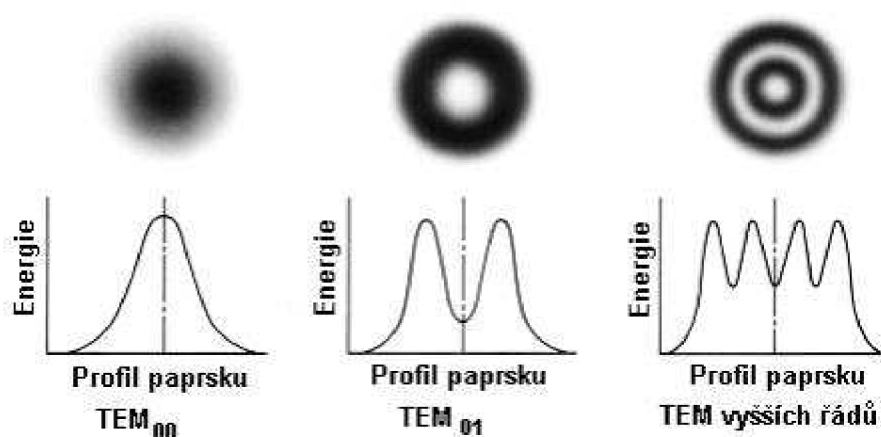
$$SPP = \frac{1}{2} \omega \cdot \frac{1}{2} \theta = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right) \cdot M^2 \quad (1)$$

kde:

SPP - parametr paprsku	[mm·mrad]
ω - průměr paprskového pásu	[mm]
θ - úhel divergence ve vzdáleném poli	[mrad]
λ - vlnová délka	[mm]
π - Ludolfovo číslo	[-]
K - šířící faktor paprsku $\left(K = \frac{1}{M^2} \right)$	[-]

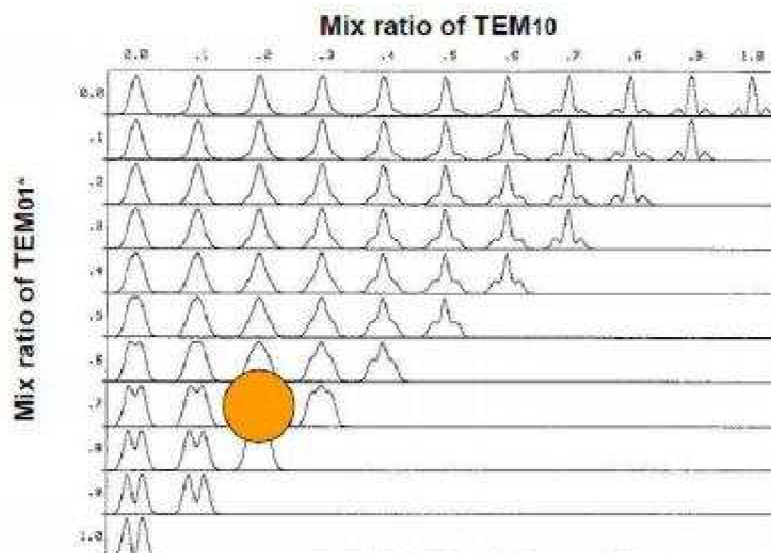
Modová struktura

Amplitudu a fázi vlnění nám rozděljuje elektromagnetické pole, které vzniká v rezonátoru a toto rozdělení ovlivňuje **TEM** (Transverzální Elektromagnetický Mód) na obr. 7. Nejnižší mód je označen jako TEM₀₀, kdy rozdělení intenzity záření je rovno Gaussově křivce. V tomto případě je intenzita energie nejvyšší v ose paprsku. Další typy módů se využívají pro různé operace, např. TEM₁₀ se využívá pro povlakování nebo tepelné zpracování.



Obr. 7 Transverzální elektromagnetický mód [5]

Laser použitý v našem experimentu (AMADA FO3015) má módovou strukturu dle obr. 8.



Obr. 8 Módová struktura průmyslového CO2 laseru AMADA FO3015 [17]

Dle obr. 8 můžeme určit přibližnou módovou strukturu laseru AMADA FO3015 pomocí vztahu (2).

$$0,3 \cdot \text{TEM}_{10} + 0,7 \cdot \text{TEM}_{01} \quad (2)$$

kde

TEM - Transverzální elektromagnetický mód [-]

1.6 Základní rozdělení laserů [1], [22], [25]. [28]

Lasery je možné rozdělit do několika skupin a to dle:

- a) použití,
- b) výkonu,
- c) způsobu čerpání energie,
- d) režimu paprsku,
- e) aktivního prostředí,
- f) vlnové délky.

a) Dělení laserů dle použití

- technologické,
- výzkumné,
- měřicí,
- lékařské,
- vojenské.

b) Dělení laserů dle dosažitelného výkonu

- nízkovýkonové (desetiny Wattů až sta Wattů),
- vysokovýkonné (jednotky až desítky kiloWattů).

c) Dělení laserů dle způsobu čerpání energie

- elektrické (elektrickým výbojem),
- optické (sluneční svit, výbojka),
- chemické (energie z chemických vazeb),
- jadernou energií (jaderným výbuchem),
- gazodynamické.

d) Dělení laserů dle režimu paprsku

- kontinuální,
- pulzní.

e) Dělení laserů dle aktivního prostředí (viz tab. 1)

- plynové,
- kapalinové,
- pevnolátkové (tyčové, vláknové, polovodičové, diskové).

f) Dělení laserů dle vlnové délky

- v oblasti viditelného pásma,
- infračervené,
- ultrafialové.

Tab. 1 Dělení laserů dle aktivního prostředí [22]

Typ laseru	Vlnová délka	Aktivní prostředí	Spektrální oblast	Příklady použití
Plynové				
CO₂ laser	10,6 μm	Oxid uhličitý	IR	strojírenský prům.
He-Ne laser	543 nm, 633 nm	Helium, Neon	zelená, červená	zaměřování polohy
Jodový laser	342 nm, 1315 nm	Jód	viditelné, IR	věda
Argonový laser	488 nm, 514 nm	Argon	modrá, zelená	laserová chirurgie
Vodíkový laser	100 – 120 nm	Vodík	UV	
Excimerové lasery	193 – 351 nm	ArF, KrCl, KrF, XeCl	UV	oftalmologie
Pevnolátkové				
Rubínový laser	694,3 nm	Rubín	červená	holografie, odstranění tetování
Nd:YAG laser	1064 nm	Neodym, YAG	IR	chirurgie, strojírenství, spektroskopie
Er:YAG laser	2,94 μm	Erbium, YAG	IR	chirurgie, stomatologie
Titan-safírový laser	690 – 1000 nm	Titan, safír	červená, IR	spektroskopie
Kapalinové				
Rhodamin 6G laser	570 – 650 nm	Rhodamin 6G	žlutá, červená	dermatologie
Polovodičové				
GaAs laser	650 nm, 840 nm	GaAs	červená, IR	laserová tiskárna
AlGaInP laser	650 nm	AlGaInP	červená	přehrávače DVD

1.7 Typy průmyslových laserů [1], [10], [13], [14], [15], [16], [18]

1.7.1 CO₂ laser

Nejrozšířenější plynový laser s aktivním prostředím molekul oxidu uhličitého, které jsou buzené doutnavým elektrickým výbojem. Takto generované záření se nachází v infračervené oblasti spektra. Trubice v rezonátoru jsou ze speciálního skla a jsou dlouhé od několika milimetrů po několik metrů a její průměr je v řádu milimetrů až několik desítek milimetrů. Trubice se při vzniku paprsku zahřívá až na 100°C, proto je chlazená buď za pomoci proudícího plynu, nebo nejčastěji vody. CO₂ lasery spadají mezi vysokovýkonné lasery a rozsah jejich výkonů je od 1kW až do 40kW. Z tohoto důvodu patří CO₂ lasery mezi nejrozšířenější. Navíc vynikají vysokou účinností, která se pohybuje mezi 8 až 10%. Nízkovýkonové lasery vynikají především malými rozměry a spolu s vysokovýkonnými lasery vysokou životností a slušnou kvalitou laserového svazku. Nevýhodou tohoto typu laseru může být vlnová délka 10,6μm a soustava zrcadel, což není optimální pro přesné obrábění. Malá objemová hustota navíc celkově zvětšuje celé systémy a ty se tak stávají nemobilními. Velká náročnost a složitost stroje vyžaduje téměř nepřetržitou kontrolu a údržbu, protože pořizovací cena ať už stroje nebo jednotlivých komponent, je nákladná. I přes tyto nedostatky nemá CO₂ laser (viz obr. 9) v dosažitelném výkonu konkurenci u jiných laserových systémů. Mezi nejznámější výrobce těchto laserů patří: Trumf, Amada, Bystronic.



Obr. 9 CO₂ laserový řezací stroj Trumpf Trumatic 3030L 3200W [10]

CO₂ lasery s pomalým axiálním prouděním: pomalé proudění plynů v rezonátoru, vhodný do 50W výkonu na 1m trubice v rezonátoru, výboj shodný směr s osou rezonátoru, dosahuje vysoce jakostních řezů

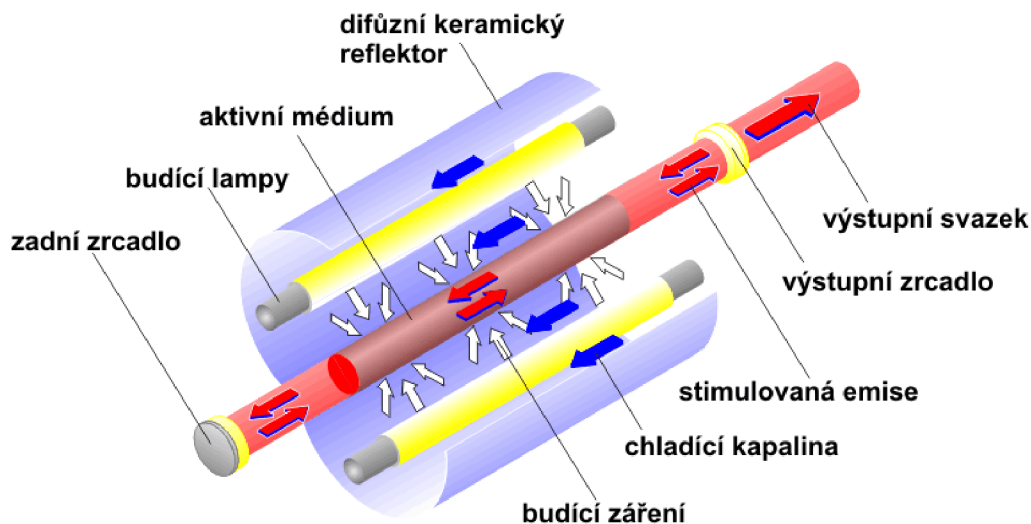
CO₂ lasery s rychlým axiálním prouděním: rychlé proudění plynů v rezonátoru, výkon 500 až 1000W na 1m trubice v rezonátoru, kolísání modu – horší kvalita řezu

CO₂ lasery s příčným prouděním: laserový svazek, proudění plynů a elektrický výboj v různých směrech, výkon až 1000W na 1m délky trubice, nevhodné pro řezání, využívají se pro svařování a tepelné zpracování

1.7.2 Nd:YAG laser

Nejpoužívanější pevnolátkový laser s aktivním prostředím neodymem, který je obohacený o yttrium-alumin granát (Y₃Al₅O₁₂). Rezonátor je tvořen výbojkami na bázi kryptonu, které jsou umístěny tak, aby odražené světlo proudilo zpět do krystalu. Z tohoto důvodu je i celý rezonátor pokoven, což zvyšuje odrazivost světla. Celý rezonátor je potřeba účinně chladit. Nd:YAG laser (obr. 10) pracuje o vlnové délce 1,06μm a výkon je dp 1,5kW. Výhodou je možnost vedení paprsku pomocí optického kabelu, což umožňuje lepší manipulování s řezací hlavou ve všech směrech. Vhodné pro robotickou výrobu. Účinnost Nd:YAG laseru je 3 – 5%, což zvyšuje nároky na zdroj přívodu energie a většina energie je přeměněna na teplo, které je nutno odvádět příslušným chladicím zařízením. V dnešní době se tyto nedostatky daří odbourávat nahrazením výbojkového čerpání čerpáním polovodičovými diodami. Ty zvyšují účinnost až na 20%, tím pádem snižují spotřebu elektrické energie a chladicího média. Nevýhodou u tohoto systému zůstává cena, jelikož polovodičové laserové diody jsou vysoce nákladné.

Nd:YAG laser našly své uplatnění v průmyslu především při svařování, vrtání nebo řezání. Hojně se ale využívají v medicíně jako skalpel nebo v očním lékařství.



Obr. 10 Konstrukce Nd:YAG laseru [16]

Plynový laser CO₂ a laser pevnolátkový Nd:YAG jsou v současnosti nejpoužívanějšími lasery, ovšem každý má své výhody a nevýhody. Podrobné porovnání najdeme v tab. 2.

Tab. 2 Srovnání plynového laseru CO₂ a pevnolátkového laseru Nd:YAG [15]

Princip laseru	CO ₂	Nd: YAG
Vlnová délka [μm]	10,6	1,06
Aktivní médium	plyn CO ₂	YAG krystal
Řízení pohybu paprsku	odrazová zrcadla, pevné čočky	flexibilně přes čočky, zrcadla, optická vlákna
Max. hustota toku energie [W/cm ²]	10 ⁷	10 ⁹
Průměr paprsku [μm]	100	15
Šířka řezu [μm]	2000	30
Elektrická účinnost [%]	8 - 10	3 - 6
Střední výkon paprsku [W]	50 - 50 000	20 - 6000
Mód	základní mód TEM ₀₀ pw, cw	multimódový pw, cw, Qs
Kvalita paprsku	optimální	slábne při vysokém výkonu
Přesnost	střední	vysoká
Vhodnost použití	řezání, svařování, tepelné zpracování, povrchové úpravy	vrtání, svařování, řezání, tepelné zpracování

1.7.3 Vláknový laser:

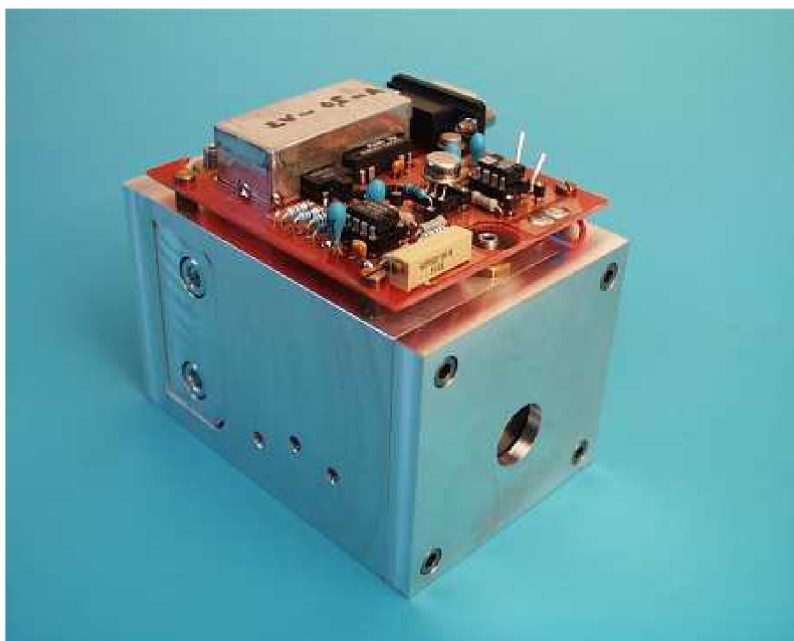
Pomocí laserové svítivé diody je čerpáno optické vlákno s Ytterbiem, které je aktivním prostředím laseru. Ve vláknu se generuje další energie pomocí světla čerpaného z laserové diody a dochází ke kumulaci energie, která následně ve formě paprsku opouští vlákno. Tento paprsek se ovšem dá skládat s paprsky vystupujícími z dalších optických vláken, což nám umožňuje dosáhnout libovolného výkonu. Tento paprsek poté prochází přes soustavu optických komponentů, které je dále upravují na požadované parametry a průchodem přes objektiv vstupuje do pracovního prostoru. Vláknový laser na obr. 11 dokáže pracovat i v pulzním režimu, kde je energie akumulována, než dosáhne určené vyšší hodnoty a mezi jednotlivými pulzy vzniká právě taková prodleva, která je nutná k další akumulaci energie. Tak lze dosáhnout vyšších výkonů. Paprsek vyniká vysokou kvalitou a laserové zařízení je spolehlivé s vysokou stabilitou, minimálním ztrátovým výkonem a dlouhou životností.



Obr. 11 Vláknový laser [14]

1.7.4 Polovodičový laser:

U polovodičových laserů (viz obr. 12) dochází k přeměně elektrického proudu přímo na světelné záření. Mají vysokou účinnost (25 - 30%), jsou lehké a nenáročné na údržbu, proto se často a poměrně snadno integrují do stávajících zařízení. Jejich vývoj je stále ještě otevřený a přichází se s řadou nových vylepšených polovodičových laserových diod (HDL), které odstraňují nedostatky předchozích jako např. velkou divergenci laserového paprsku, malou provozní životnost. Další nevýhodou je vysoká cena těchto diod.



Obr. 12 Polovodičový laser [13]

2 VYUŽITÍ LASERŮ [1], [6]

Laser má díky svým jedinečným a nenahraditelným vlastnostem zastoupení v mnoha vědních, průmyslových, vojenských a spoustě dalších oborech.

Rozdělení do 3 základních skupin:

Průmysl:

- svařování,
- řezání,
- vrtání,
- mikroobrábění,
- gravitování,
- přesné měření vzdáleností,
- dekorativní účely (dekorace skla, atp.).

Medicína:

- chirurgie,
- oční lékařství,
- onkologie,
- dermatologie.

Ostatní odvětví:

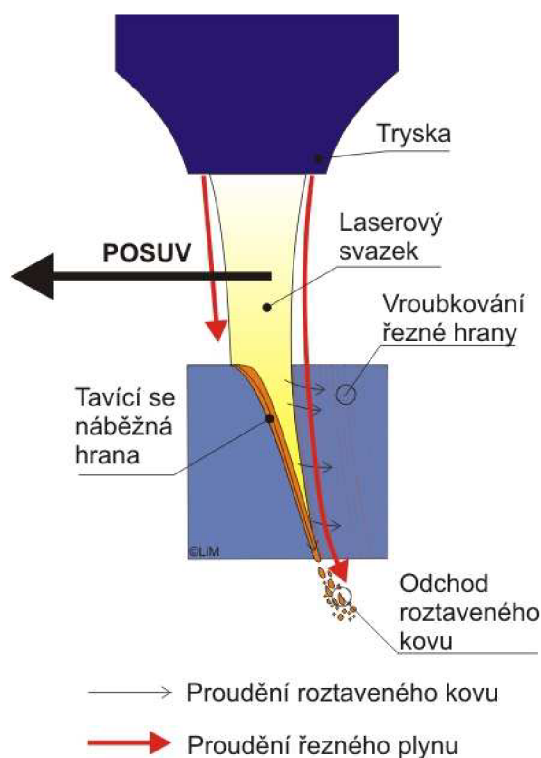
- astronomie,
- geofyzika,
- geodézie,
- vojenské aplikace,
- jaderná fyzika,
- laserové tiskárny, kopírky, vypalovačky CD a DVD,
- metrologie,
- ekologie.

Z předchozího výčtu je patrné, že laser je nedílnou součástí našeho běžného života a setkáváme se s ním častěji, než si možná uvědomujeme. Přístroje a zařízení pracující s laserovou technologií nám v mnoha případech usnadňují a ulehčují život a ve spoustě případech je tato technologie nenahraditelná a nedocenitelná.

2.1 Řezání laserem [1], [8], [18], [28], [29]

Při řezání laserem dochází k roztavení, a v některých případech až k sublimaci, děleného materiálu a ten je následně vyfouknut řezným plynem ven za spáry. Natavení se děje pomocí zaostřeného laserového paprsku s vysokou hustotou energie, přičemž je důležité, co nejrychleji natavit pokud možno co nejmenší plochu materiálu, aby nedocházelo k velkým tepelně ovlivněným zónám v oblasti řezu. Pro řezání laserem jsou v tomto ohledu vhodné materiály s nízkou tepelnou vodivostí. Důležitými faktory při řezání jsou jakost povrchu (leštěný povrch absorbuje energii hůře než hrubý), tepelné a optické vlastnosti. Během procesu řezání na obr. 13 se nejčastěji pohybuje řezací hlava a obrobek je v klidu a spolu s ní je přiváděn do prostoru řezu vyfukující plyn.

V dnešní době jsou nejrozšířenějšími lasery určenými pro řezání CO₂ lasery s výkonem do 6kW a rychlosti řezu jsou závislé na druhu vyfukovacího plynu, vlastnostech řezaného materiálu a jeho tloušťce.



Obr. 13 Řezný proces [8]

Řezání laserem můžeme rozdělit do 4 základních skupin dle použitých řezných plynů:

- tavné,
- oxidační,
- sublimační,
- vzduchem.

2.1.1 Tavné řezání:

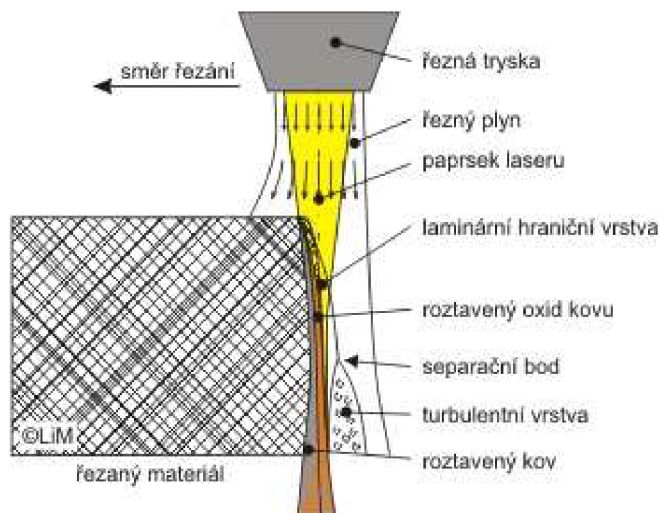
Tavenina u děleného materiálu vzniklá lokálním natavením je vyfukována z místa natavení chemicky čistým inertním plynem, který je dopravován do místa řezu, ovšem nepodílí se na vlastním řezání. S výkonem laseru roste lineárně řezná rychlost a naopak klesá s tloušťkou řezaného dílu, opět přibližně lineárně.

Pro dosažení kvalitních řezných hran, povrchu bez okují a minimálního chemického ovlivnění v oblasti řezu se využívá dusík (N) s vysokou čistotou (min. 99,999 objemových procent). V tomto případě je potřeba zvolit vysoký tlak vyfukovaného plynu (až 2 MPa) a na spodní hraně řezu se mohou objevovat otřepy.

Tento typ řezání je vhodný zejména pro vysoce legované oceli, korozivzdorných ocelí, mosazi, mědi, hliníku a pozinkovaných plechů. Mimo dusíku se využívá jako inertní plyn ještě argon (Ar), vhodný zejména při řezání titanu, kdy zabraňuje přístupu vzduchu k místu řezu, vzhledem k vysoké reaktivitě titanu s kyslíkem popř. vzduchem.

2.1.2 Oxidační řezání:

Oxidační řezání (viz obr. 14) se od tavného liší pouze využitím kyslíku jako vyfukovacího plynu, přičemž jeho čistota dosahuje 99,95 objemových procent. Tlak řezného plynu je závislý na tloušťce řezaného materiálu. Při tloušťce do 3 mm je vyfukovací tlak okolo 0,5 MPa a s rostoucí tloušťkou překvapivě tlak klesá. Pro tloušťky do 10 mm bývá tlak okolo 0,1 MPa a u silnějších materiálů bývá zpravidla tlak pod 0,1 MPa. Na rozdíl od tavného řezání při oxidačním řezání vstupuje řezný plyn do procesu řezu a to reakcí kyslíku a roztaveného kovu, při níž dochází k dalšímu ohřevu řezaného materiálu. Tato reakce se nazývá exotermní reakce. Tato reakce umožňuje zvýšení řezných rychlostí, ale projevuje se méně jakostním a širším řezem a tepelně ovlivněná oblast je vyšší. Z těchto důvodů se oxidační řezání nevyužívá při řezání přených obrobků a obrobků s ostrými geometrickými tvary, při vyřezávání malých otvorů, apod. Částečně se tento nedostatek dá vyřešit optimalizací použitého výkonu laseru v závislosti na tloušťce materiálu nebo použitím pulzního provozu laseru.



Obr. 14 Schema oxidačního řezání [8]

2.1.3 Sublimační řezání:

U sublimačního řezání je nutná maximální možná koncentrace paprsku na co nejmenší plochu, aby došlo až k sublimaci (odpaření) řezaného materiálu z místa řezu. Inertní plyn má za úkol odvádět vzniklé páry z místa řezu. Řezat se dá pouze materiál, který má tloušťku stejnou jako je průměr paprsku, jinak by páry zkondenzovaly a vytvořil by se svar, což značně omezuje využití tohoto jinak vysoce kvalitního způsobu řezání. Vhodný je zejména pro tenké fólie a různé obalové (i nekovové) materiály.

2.1.4 Řezání s podporou vzduchu:

Tento typ řezání je kombinace tavného a oxidačního řezání. Inertní plyn je obyčejný vzduch, jehož složení je 78% dusíku (N), 21% kyslíku (O₂) a 1% tvoří vzácné plyny. Mezi výhody lze jednoznačně uvést jednoduchou výrobu stlačeného vzduchu, která se dá provádět přímo v bezprostřední blízkosti stroje a cenová náročnost je minimální. Naopak nevýhodami je méně kvalitní řez a tloušťka řezaného materiálu je výrazně omezená.

2.2 Výhody a nevýhody laserového řezání [28]

Výhody

- vysoká přesnost řezaných dílů u slabých a středních tloušťek materiálů,
- řezání velmi malých otvorů, úzkých pásků, tvarů s ostrými úhly,
- řezná hrana kolmá vůči povrchu,
- velmi malé přivedené teplo, malé deformace obráběného kusu,
- velmi malá šířka řezné spáry (0,2 - 0,4 mm),
- vysoká řezná rychlost,
- lze řezat téměř všechny technické materiály.

Nevýhody

- vysoké pořizovací a provozní náklady,
- omezení tloušťky materiálu: konstrukční ocel do 25mm, vysokolegovaná ocel do 15 mm, hliník do 10 mm,
- nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku,
- hrubý řez u řezání konstrukční oceli s vyšším obsahem Si a P,
- snížení stability procesu u řezání lesklých povrchů,
- menší účinnost (CO₂ - laser max. 10%).

2.3 Parametry laserového záření použitého pro řezání [12], [29]

Laserový paprsek je nadefinován parametry:

- vlnovou délkou,
- výkonem,
- rozdělením hustoty energie v příčném průřezu,
- polarizací,
- divergencí,
- průměrem.

Aby mohl laserový paprsek řezat, je zapotřebí dosažení nezbytné hustoty energie. Té se dosáhne zaostřením optikou, která je dána:

- ohniskovou vzdáleností,
- transparentí,
- absorpcí,
- reflexivitou,
- fokusační plochou,
- hloubkou ostrosti.

Klíčové parametry pro vlastní technologický proces:

- výkon laserového paprsku,
- transparence (propustnost) fokusační optiky,
- ohnisková vzdálenost optiky,
- poloha ohniska ve vztahu k povrchové ploše obrobku,
- řezná rychlost,
- odstup trysky od plechu.

Tepelně-fyzikální vlastnosti řezaného materiálu:

- reflexivita řezaného materiálu rozhodující pro vlnovou délku laserového paprsku,
- hustota materiálu,
- tepelná kapacita,
- skupenské teplo tání,
- skupenské teplo výparné,
- tepelná vodivost,
- teplota tání,
- teplota vypařování,
- chemická energie vzniklá při reakci řezaného materiálu s kyslíkem,
- elektrický odpor materiálu.

Parametry řezného plynu pro řezání jsou podstatné tyto parametry řezného plynu:

- druh plynu,
- pracovní tlak,
- průměr trysky, kterou proudí řezný plyn,
- geometrie tvaru trysky.

Tab. 3 Porovnání laseru s jinými nekonvenčními procesy dělení materiálu [12]

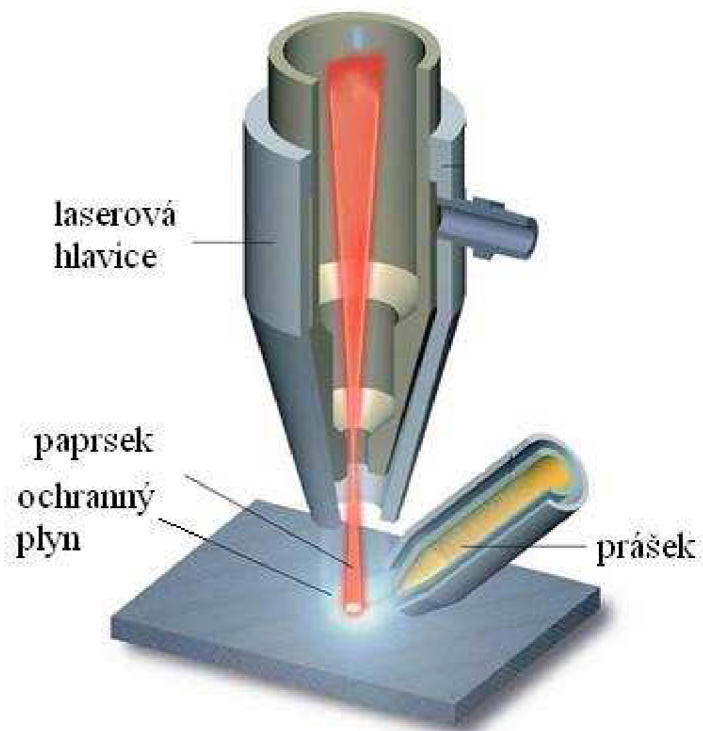
Metoda	Laser	Vodní paprsek	Plazma
Dělitelné materiály	všechny, krom mat. s vysokou světelnou odrazivostí	všechny materiály	pouze kovy (vodivé materiály)
Tloušťka řezaného materiálu	střední a malá, ocel do 25 mm	široký rozsah, ocel do 500 mm	střední a velká, ocel do 40 mm
Velikost dílce	malé i velké dílce	malé i velké dílce	velké dílce
Složitost tvaru řezu	složité tvary	složité tvary	jednoduché tvary
Tvrdomost řezaného materiálu	nemá vliv na rychlost řezání	mírně ovlivňuje rychlost řezání	nemá vliv na rychlost řezání
Teplota řezu	až 10 000 °C	do 40 °C	nad 1 000 °C
Tepelně ovlivněná oblast	malá	není	velká
Struktura povrchu obrobené plochy	nízká drsnost	nízká drsnost	výrazné rýhy
Kolmost řezu	mírný odklon	mírný odklon	silný odklon
Vznik plyných emisí	malé množství	nevznikají	velké množství
Vznik oxidických povlaků	vznikají pouze při řezání kyslíkem	pouze u mat. korodujících při styku s vodou	vznikají

2.4 Svařování laserem [20], [30]

Pro svařování laserem (viz obr. 15) se používají obdobně jako pro řezání lasery Nd:YAG, CO₂ a diodové lasery. Na rozdíl od řezání je zapotřebí menší intenzity záření, ale naopak je potřeba delšího pulzu. Laser nataví jen velmi malou oblast, takže výsledný svar má odlišnou geometrii spoje a minimální tepelně ovlivněnou oblast. Při svařování laserem vzniká tzv. „Key hole“, která zaručuje úzký a současně hluboký svar.

Výhody:

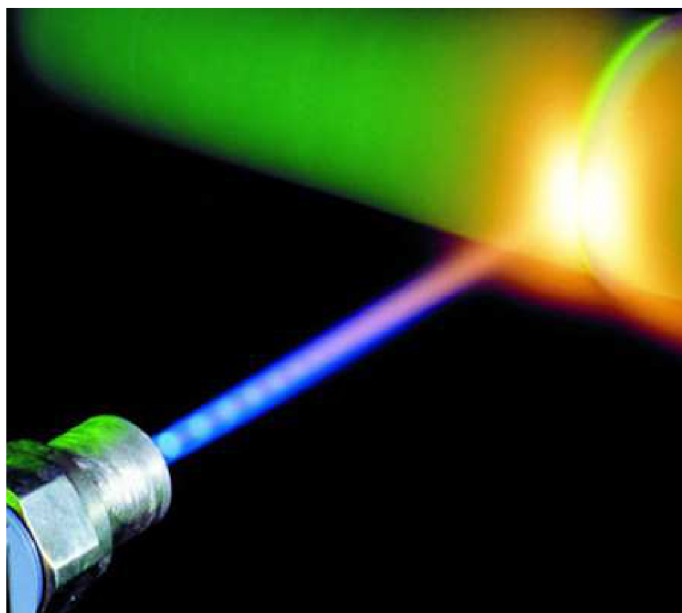
- úzký a hluboký svar,
- malá tepelně ovlivněná oblast,
- vysoká rychlost svařování,
- vysoká pevnost a kvalita svaru,
- možnost svaru i při omezeném přístupu z jedné strany,
- svařování konvenčními metodami problematicky svařitelných materiálů,



Obr. 15 Princip svařování laserem [20]

2.5 Tepelné zpracování pomocí laserového paprsku [6], [31]

Tepelným zpracováním pomocí laserového paprsku na obr. 16 se dá kalit, popouštět, žíhat, tepelně zpevňovat s natavením povrchu, atd. Díky vysoké koncentraci paprsku na malou plochu lze tepelně zpracovávat materiál lokálně v místě potřeby bez nutnosti ohřevu celé součásti a to i v těžko dosažitelných místech. Díky rychlému ohřevu je tepelně ovlivněná oblast minimální.



Obr. 16 Tepelné zpracování laserovým paprskem [6]

2.6 Další možnosti využití laseru [31]

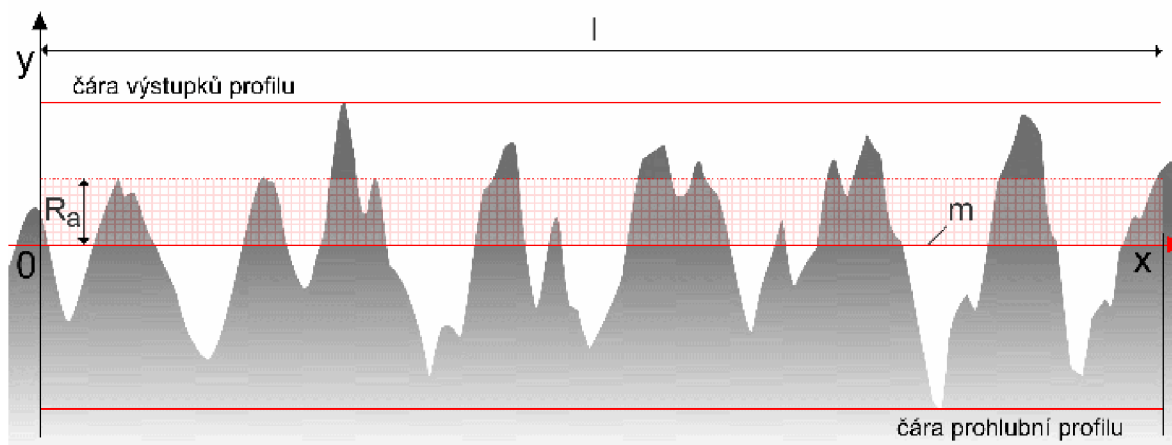
- Vrtání,
- nanášení ochranných a otěruvzdorných materiálů,
- gravitování,
- leštění povrchu,
- značení, značkování a popis.

2.7 Vady při řezání laserem [18], [21], [24], [31]

Jako kritéria vyhodnocené pouhým okem můžeme brát například vydrolení materiálu, ořepy či rýhy po řezání. Pro přesnější vyhodnocení lze využít doplňkové zařízení pro měření drsnosti, kolmosti a šířky mezery řezné spáry. Vyhodnocení řezné plochy probíhá dle normy ČSN EN ISO 9013.

Drsnost

Drsnost R_a je definovaná jako střední aritmetická hodnota (viz obr. 17) absolutních úchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky.



Obr. 17 Střední aritmetická hodnota R_a [21]

Při řezání laserovým paprskem jsou rýhy v řezaném materiálu v rovině rovnoběžné s osou paprsku. Drsnost je určena hloubkou těchto rýh v řezné rovině. Jakost řezné plochy se u laserového řezání snižuje s rostoucí tloušťkou materiálu.

Tvar a šířka řezu

Šířka řezu je definovaná jako vzdálenost mezi povrchy řezu na horní hraně řezu nebo těsně pod ní, pokud došlo k natavení horní hrany, způsobené řezacím paprskem. U řezání laserem obvykle nastává situace, kdy není rovnoběžné horní ostří vůči spodnímu ostří.

S rostoucí tloušťkou materiálu se zvětšuje šířka řezu, přičemž záleží na:

- ohniskovém průměru,
- materiálu,
- vlnové délce,
- postupu řezání.

U materiálů do 6mm tloušťky je šířka řezné spáry 0,15mm a u materiálu s tloušťkou od 20 do 30mm může být šířka řezné spáry až 0,5mm. U řezu je důležitá konstantní šířka spáry v celé délce řezu, jinak rozměry řezaných částí ztrácí přesnost.

Otřepy

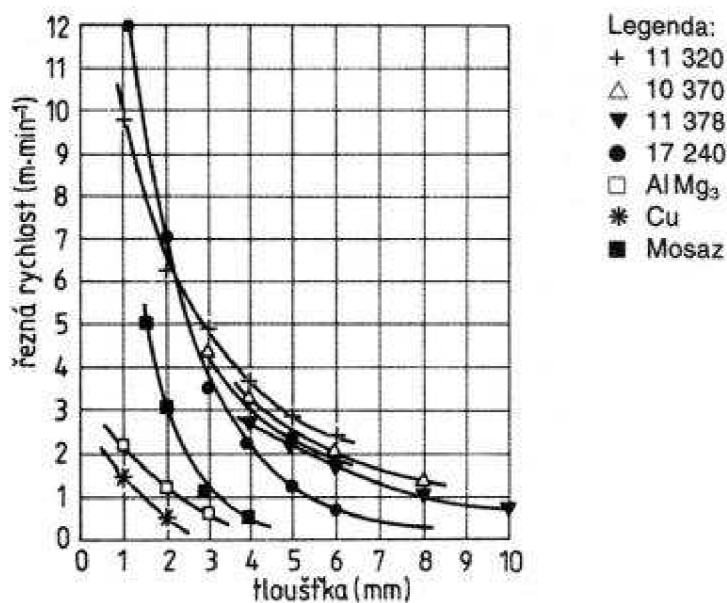
Jedním z nejdůležitějších kritérií pro vyhodnocování řezu pomocí laseru jsou otřepy. Otřepy se musí odstraňovat, proto jsou zapotřebí dodatečné operace. Dají se odstranit například frézováním nebo broušením. Otřepů existuje několik druhů, od měkkých a drobných až po tvrdé a ostré.

Materiál a výkon laseru

Každý typ laseru má své specifické parametry a je nutné přizpůsobit řezací postup, materiál a jeho tloušťku. Maximální možná tloušťka řezaného materiálu se odvíjí od výkonu laseru a typu materiálu. Přibližně platí, že s rostoucí tloušťkou řezaného materiálu roste potřebný výkon laseru.

Tloušťka a řezná rychlost

Řezná rychlost s přibývajícím tloušťkou materiálu exponenciálně klesá. Z grafu 1 lze vyčíst závislosti tloušťky na řezné rychlosti u některých vybraných druhů řezaných materiálů.



Graf 1 Závislost tloušťky materiálu na řezné rychlosti při výkonu laseru 1500W [24]

Provozní režim

Při využití nepřetržitého nebo pulzního režimu je možno ovládat množství energie, které musí být přivedeno do obrobku.

Skruz

Skruz je definován jako vzdálenost mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání.

Vady řezu závisující na parametrech řezání

Parametry, které nejvíce ovlivňují řez, jsou ohnisková vzdálenost, výkon laserového paprsku, řezná rychlost a tlak vyfukovacího plynu.

2.7.1 Poloha ohniska a jeho vliv na jakost řezné plochy

Pokud je ohnisko posunuto příliš blízko k řezanému materiálu, vznikají výrazné otřepy na spodní hraně řezu a při ohnisku nad řezaným materiálem vzniká hrubý řez v dolní části řezu (viz obr. 18).



Obr. 18 Závislost polohy ohniska na jakost řezné plochy

2.7.2 Výkon laserového paprsku a jeho vliv na jakost řezné plochy

Při nízkém výkonu laseru můžeme sledovat výrazné zhoršení jakosti povrchu ve spodní části řezu a obdobně je tomu i u příliš velkého výkonu (viz obr 19).



Obr. 19 Závislost výkonu laseru na jakost řezné plochy

2.7.3 Řezná rychlost a její vliv na jakost řezné plochy

Řezná rychlost má významný vliv na jakost povrchu. Při nízké řezné rychlosti dochází k vytrhávání materiálu na spodní hraně řezu a vysokému nárustu drsnosti. U vysoké řezné rychlosti dochází k nedokonalému řezu na spodní hraně (viz obr. 20).



Obr. 20 Závislost řezné rychlosti na jakost řezné plochy

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ [23]

Po celou dobu experimentu byl použit laserový řezací stroj Amada FO3015 a drsnoměr MarSurf M 300.

3.1 Použitý Laser

AMADA FO3015NT (viz obr. 21).

Výrobní číslo: FO3015.143, rok výroby 2006, firma Dendera a.s., Kanice 104.



Obr. 21 CO₂ laser AMADA FO3015NT [23]

Parametry stroje:

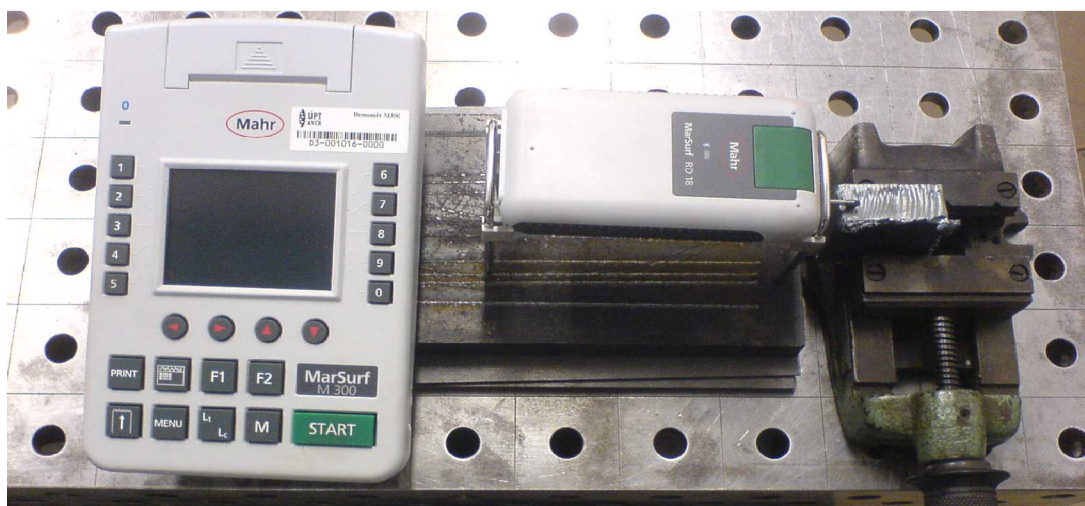
Model	Amada FO3015
Výkon [kW]	4
Pracovní pojezd X x Y x Z [mm]	3070x1550x200
Řezná rychlost [m/min-1]	0 - 20
Přesnost řezání [mm/m]	0,1/1
Nosnost stolu [kg]	850
Laserový rezonátor	C-4000
Rozměry laserového řezacího stroje DxŠ [mm]	9789x2967
Rozměry pomocného stolu DxŠ [mm]	3000x1500
Hmotnost laserového zařízení [kg]	12000
Výrobní číslo stroje	FO 3015.143
NC řídicí jednotka	Fanuc FS-160iLA (osy X,Y,Z adaptivní optika)
Vlnová délka [μm]	10,6
Maximální tlak	10,3 barů

Maximální řezané tloušťky materiálů

Konstrukční oceli	do 20mm
Nerezové oceli	do 10mm
Hliník	do 6mm
Mosaz	do 4mm

3.2 Drsnoměr MarSurf M 300

Jedná se o příruční drsnoměr (viz obr. 22) k mobilnímu použití při dílenských měřeních. Naměřená data byla odečítána na digitálním displeji. V praktickém měření byly pomocí tohoto drsnoměru měřeny všechny vzorky, a to povrchy všech jejich řezných ploch.



Obr. 22 Drsnoměr MarSurf M 300

Technická data drsnoměru:

Rozsah měření	350 μ m (-200 μ m až +150 μ m)
Maximální délka snímané dráhy	17,5mm
Interní paměť USB	30 profilů nebo 40000 výsledků měření
Rozhraní	bluetooth 2.0
Hmotnost	1kg

Měřené parametry

- R_a – aritmetická střední hodnota drsnosti DIN EN ISO 4287 : 1998
- R_z – průměrná hloubka drsnosti DIN EN ISO 4287 :1998
- R_{sm} – střední šířka elementů profilu DIN EN ISO 4287 : 1998

Přístroj odpovídá normám DIN EN ISO 3274

4 POUŽITÝ MATERIÁL [33]

Ocel Raex 250 (S235JR dle EN 10025-2 : 2005; 11375 dle ČSN)

Raex je vysokopevnostní ocel odolná proti opotřebení, s vysokou tvrdostí a rázovou houževnatostí (viz tab. 5). Další fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4.

S ocelí Raex lze dosáhnout prodloužení životnosti strojních zařízení, snížit opotřebení konstrukčních komponentů a ušetřit náklady. Umožňuje také vytvářet inovativní design a vyrábět lehké výrobky, které zlepšují energetickou účinnost.

Možnost využití

- Lžíce rýpadel a kontejnery
- Ostré pracovní hrany zemních strojů
- Součásti důlních strojů podléhající rychlému opotřebení
- Součásti vystavené rychlému opotřebení v betonárnách a u dřevozpracujících strojů
- Konstrukce plošin
- Nakladače, nálevky

Tab. 4 Fyzikální vlastnosti oceli RAEX250 [33]

	Symbol	Číselná hodnota	Jednotka
Hustota	ρ	7,85	kg/dm ³
Bod tavby	T_{mp}	≈1530	°C
Tepelná kapacita	c	0,50	kJ/kg°K
Tepelná vodivost	λ	≈58	W/m°K
Koeficient tepelné roztažnosti	α	12 x 10-6	1/°K
Rezistivita	ρ	140...250	nΩm
Modul pružnosti	E	210000	MPa
Modul pružnosti ve smyku	G	78500	MPa
Poissonovo číslo	ν	0,3	–

Chemické složení

C=0,17%; Mn= max. 1,4%; P= max. 0,035; S= max. 0,035%; N= max. 0,012%

Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli RAEX 250 [33]

Jakost oceli	Mez pružnosti $R_{p0,2}$ MPa	Pevnost v tahu R_m MPa	Tažnost $A_5\%$
Raex 250	225	510	26

Tepelné zpracování [33]

Tvrzené oceli nejsou určeny pro tepelné zpracování. Popouštění v maximální teplotě 200°C je jediným tepelným zpracováním, které uchová odolnost silného plechu proti otěru na dobré úrovni. Tepelné zpracování ve větších teplotách snižuje pevnost a tvrdost ocelí a jejich odolnost proti otěru.

Tepelné dělení a svařitelnost [33]

Svařitelnost ocelí Raex dosahuje mezi otěruvzdornými ocelmi špičkové úrovně. Vhodná ke svařování všemi obvykle používanými způsoby svařování. S rostoucí tloušťkou se zvyšuje hodnota uhlíkového ekvivalentu a vzniká riziko výskytu trhlin za studena v oblasti svaru.

5 HLEDÁNÍ OPTIMÁLNÍCH ŘEZNÝCH PARAMETRŮ

Měření proběhla na půdě AVČR., materiál byl poskytnut firmou Dendera a.s. Cílem těchto pokusů je nalezení optimálních řezných podmínek u oceli s obchodním označením RAEX250. Na základě naměřených parametrů u řezných ploch v závislosti na různých nastaveních stroje se vyhodnotí optimální podmínky pro řezání laserem v ochranné atmosféře CO₂. Pro zjišťování přesných údajů kvality řezné plochy bylo použito drsnoměru MarSurf M 300 a výsledné hodnoty byly zapsány. Musíme ovšem počítat s tím, že měřicí rozsah drsnoměru je omezený jak délkou měření, tak rozsahem měření a proto mohou být některé výsledky zkreslené. Na několikanásobně zvětšených vzorcích pak byla provedena kontrola otřepů, vrubů a jiných vad.

5.1 Rozdělení vzorků

Vzhledem k velké variaci proměnných se experiment zaměřil na 4 parametry, nejvíce ovlivňující výslednou jakost řezných ploch, a to:

- výkon,
- tlak vzduchu,
- řezná rychlost,
- ohnisková vzdálenost.

Ze dvanácti vzorků byly vždy tři vystaveny změnám jedné proměnné, přičemž ostatní parametry zůstaly konstantní.

5.2 Nalezení optimálních parametrů při laserovém řezání oceli RAEX 250

Vzorek č. 1

Tab. 6 Parametry řezu vzorku č. 1

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost $f_{oc,abs}$ [mm]	rychlost posuvu v [$mm \cdot min^{-1}$]
2900	0,4	9	530



První vzorek na obr. 23 byl nařezán dle parametrů tab. 6. Na vzorku lze na první pohled vidět velké otřepy na počátku řezu a řezná plocha se vyznačuje nízkou jakostí, která se s následnými řeznými plochami postupně zlepšuje. Naměřené hodnoty jsou zahrnuty v tab.7.

Tab. 7 Naměřené hodnoty u vzorku č. 1

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	2,089	1,148	1,341	0,996
Rz [μm]	11,13	7,262	7,071	5,213
Rsm [μm]	136	108	80	71

Obr. 23 Vzorek číslo 1

Vzorek č. 2

Tab. 8 Parametry řezu vzorku č. 2

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost $f_{oc_{abs}}$ [mm]	rychlost posuvu v [mm.min ⁻¹]
2900	0,5	9	530



Druhý vzorek na obr. 24 byl nařezán dle parametrů tab. 8. Vzorek vykazuje podobné hodnoty, jaké byly naměřeny u vzorku číslo 1. Naměřené hodnoty jsou zahrnuty v tab. 9.



Tab. 9 Naměřené hodnoty u vzorku č. 2

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	1,374	1,174	1,417	1,105
Rz [μm]	8,095	5,691	7,532	5,936
Rsm [μm]	134	87	131	133

Obr. 24 Vzorek číslo 2

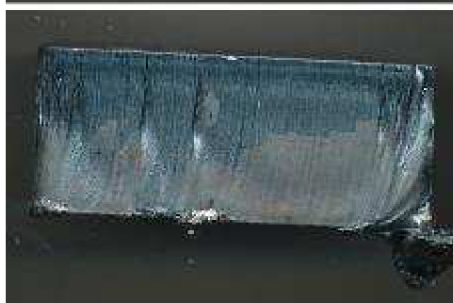
Vzorek č. 3

Tab. 10 Parametry řezu vzorku č. 3

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost $f_{oc_{abs}}$ [mm]	rychlost posuvu v [mm.min ⁻¹]
2900	0,6	9	530



Třetí vzorek na obr. 25 byl nařezán dle parametrů tab. 10. Otřepy se vyskytují pouze v části počátku řezu, jakost se opět s postupem řezu zlepšovala. Naměřené hodnoty jsou zahrnuty v tab. 11.



Tab. 11 Naměřené hodnoty u vzorku č. 3

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	1,184	3,277	1,434	3,764
Rz [μm]	6,483	14,03	7,533	16,74
Rsm [μm]	56	54	87	349

Obr. 25 Vzorek číslo 3

Vzorek č. 4

Tab. 12 Parametry řezu vzorku č. 4

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost $f_{oc_{abs}}$ [mm]	rychlost posuvu v [mm.min ⁻¹]
3100	0,4	9	530



U čtvrtého vzorku na obr. 26 došlo k navýšení výkonu dle parametrů tab. 12. Na první pohled oproti předchozím vzorkům lze zpozorovat zhoršení jakosti řezných ploch a vznik výrazných otřepů. Naměřené hodnoty jsou zahrnuty v tab. 13.



Tab. 13 Naměřené hodnoty u vzorku č. 4

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	1,833	1,301	2,736	2,651
Rz [μm]	9,357	6,868	12,14	12,6
Rsm [μm]	82	79	128	190

Obr. 26 Vzorek číslo 4

Vzorek č. 5

Tab. 14 Parametry řezu vzorku č. 5

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost foc_{abs} [mm]	rychlost posuvu v [mm.min ⁻¹]
3100	0,5	9	530



Oproti předchozímu vzorku byl pátý vzorek na obr.27 nařezán při stejném výkonu, ale s vyšším tlakem vzduchu (viz tab. 14), což zlepšilo kvalitu řezných ploch, ale zhoršilo kvalitu spodních hran, na kterých se vyskytují otřepy. Naměřené hodnoty jsou zahrnuty v tab. 15.



Tab. 15 Naměřené hodnoty u vzorku č. 5

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	1,372	1,646	1,582	1,138
Rz [μm]	8,605	8,590	8,461	5,402
Rsm [μm]	92	151	130	92

Obr. 27 Vzorek číslo 5

Vzorek č. 6

Tab. 16 Parametry řezu vzorku č. 6

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost foc_{abs} [mm]	rychlost posuvu v [mm.min ⁻¹]
3100	0,6	9	530



Šestý vzorek na obr. 28 byl řezán s tlakem vzduchu 0,6 barů a při těchto parametrech (viz tab. 16) došlo k vytrhávání materiálu na horní hraně a celkovému zhoršení kvality řezané plochy. Naměřené hodnoty jsou zahrnuty v tab. 17.



Tab. 17 Naměřené hodnoty u vzorku č. 6

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	2,772	1,721	2,627	1,518
Rz [μm]	13,26	8,260	11,89	7,533
Rsm [μm]	121	124	213	122



Obr. 28 Vzorek číslo 6

Vzorek č. 7

Tab. 18 Parametry řezu vzorku č. 7

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost foc_{abs} [mm]	rychlost posuvu v [mm.min ⁻¹]
2900	0,4	10	530



Pro neúspěšné pokusy se zvýšeným výkonem laseru došlo k navrácení výkonu na původní hodnotu a vzorek číslo 7 na obr. 29 byl řezán parametry v tab. 18. Ohnisková vzdálenost byla posunuta o 1mm dál od řezaného materiálu. Naměřené hodnoty jsou zahrnuty v tab. 19.



Tab. 19 Naměřené hodnoty u vzorku č. 7

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	1,567	1,365	1,581	1,231
Rz [μm]	6,719	6,255	8,505	5,878
Rsm [μm]	110	82	75	91

Obr. 29 Vzorek číslo 7

Vzorek č. 8

Tab. 20 Parametry řezu vzorku č. 8

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost foc_{abs} [mm]	rychlost posuvu v [mm.min ⁻¹]
2900	0,5	10	530



S následným zvýšením tlaku vzduchu u vzorku číslo 8 na obr. 30 a parametry řezu dle tab. 20 došlo k mírnému zhoršení jakosti řezných ploch. Naměřené hodnoty jsou zahrnuty v tab. 21.



Tab. 21 Naměřené hodnoty u vzorku č. 8

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	1,795	2,376	1,778	1,121
Rz [μm]	10,73	12,58	7,895	6,015
Rsm [μm]	149	138	84	80

Obr. 30 Vzorek číslo 8

Vzorek č. 9

Tab. 22 Parametry řezu vzorku č. 9

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost foc_{abs} [mm]	rychlost posuvu v [mm.min ⁻¹]
2900	0,6	530	10



S dalším nárůstem řezného tlaku na hodnotu 0,6 barů u vzorku číslo 9 na obr. 31 došlo k mírnému poklesu výskytu otřepů, ovšem jakost řezných ploch je se nezlepšila. Vzorek byl řezán dle parametrů v tab. 22 a výsledné hodnoty jsou zapsány v tab. 23.

Tab. 23 Naměřené hodnoty u vzorku č. 9

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	1,425	2,434	4,557	1,043
Rz [μm]	6,995	9,6	18,09	5
Rsm [μm]	112	173	178	133

Obr. 31 Vzorek číslo 9

Vzorek č. 10

Tab. 24 Parametry řezu vzorku č. 10

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost $f_{oc_{abs}}$ [mm]	rychlost posuvu v [mm.min ⁻¹]
2900	0,4	8	530



U vzorku číslo deset viz obr. 32 bylo ohnisko posunuto blíže k řezanému materiálu a to na vzdálenost 8mm (viz tab. 24). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 25.



Tab. 25 Naměřené hodnoty u vzorku č. 10

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	1,228	2,264	3,348	2,511
Rz [μm]	6,403	7,906	14,9	12,35
Rsm [μm]	65	262	171	73



Obr. 32 Vzorek číslo 10

Vzorek č. 11

Tab. 26 Parametry řezu vzorku č. 11

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost $f_{oc_{abs}}$ [mm]	rychlost posuvu v [mm.min ⁻¹]
2900	0,5	8	530



Při posuvu ohniska a zvýšení tlaku vzduchu u vzorku číslo 11 na obr. 33 docházelo ke značným vrubům na vrchní hraně řezaného materiálu a naopak na spodní hraně se tvořily ořepy v řádech milimetrů. Řezné hodnoty jsou v tab. 26 a výsledné drsnosti jsou uvedeny v tab. 27.



Tab. 27 Naměřené hodnoty u vzorku č. 11

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	2,918	2,248	0,981	3,175
Rz [μm]	14,19	9,680	5,506	16,22
Rsm [μm]	108	122	76	110



Obr. 33 Vzorek číslo 11

Vzorek č. 12

Tab. 28 Parametry řezu vzorku č. 12

Materiál RAEX 250, tloušťka materiálu 20mm			
výkon laseru P [W]	tlak vzduchu p [bar]	ohnisková vzdálenost foc_{abs} [mm]	rychlost posuvu v [mm.min ⁻¹]
2900	0,6	8	530



Dvanáctý vzorek na obr. 34 nevykazuje známky zlepšení jakosti řezných ploch ani při nárůstu tlaku (viz tab.28). Za povšimnutí ovšem stojí, že se při snížené poloze ohniska u vzorků číslo 10, 11 a 12 u třetí řezné plochy vždy skokově změnila jakost povrchu. Naměřené hodnoty byly vepsány do tab. 29.

Tab. 29 Naměřené hodnoty u vzorku č. 12

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	1,584	2,015	1,229	1,3
Rz [μm]	8,684	9,99	6,299	6,112
Rsm [μm]	108	142	93	87

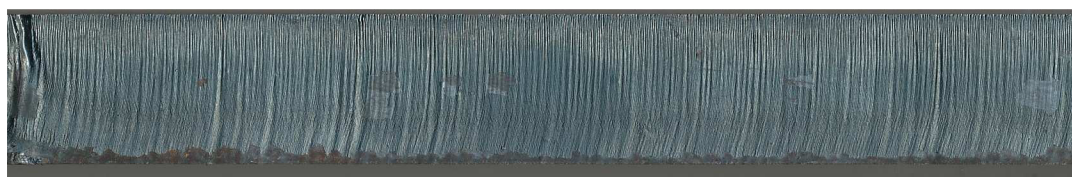
Obr. 34 Vzorek číslo 12

Referenční vzorek

Referenční vzorek slouží k porovnání jakostí řezných ploch (viz obr. 35 a obr. 36) mezi ním a jednotlivými vyřezanými vzorky. U řezaných vzorků bylo snahou co nejvíce přiblížit jakost řezných ploch referenčnímu vzorku, jelikož jeho řezné hrany jsou vyhovující. Na obr. 35 a 36 lze vidět, že referenční vzorek neobsahuje žádné výrazné ořepy, výrazné rýhy nebo jiné vady způsobené při řezání laserem.



Obr. 35 Jakost řezné plochy referenčního vzorku zepředu



Obr. 36 Jakost řezné plochy referenčního vzorku zezadu

U tohoto vzorku byly naměřeny hodnoty viz tab .30.

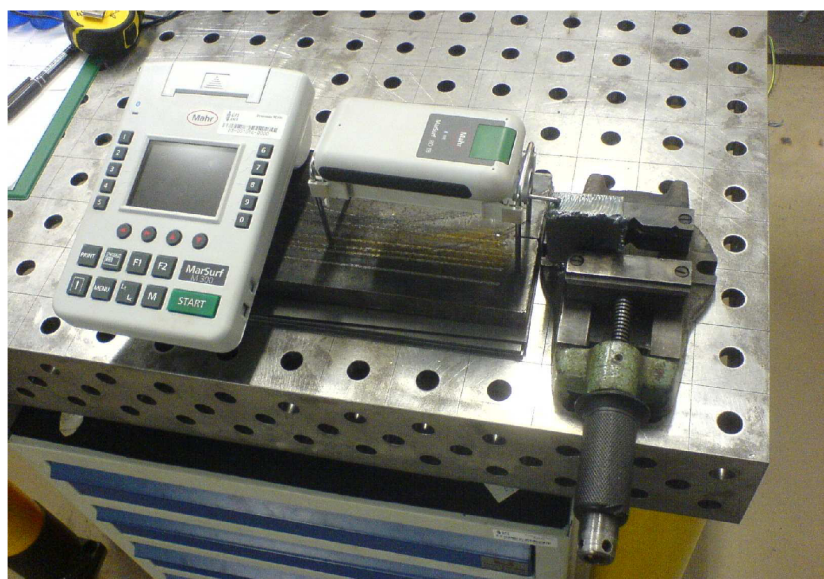
Tab. 30 Naměřené hodnoty u referenčního vzorku

Materiál RAEX 250, tloušťka 20mm				
	hrana 1	hrana 2	hrana 3	hrana 4
Ra [μm]	1,847	2,015	1,299	1,3
Rz [μm]	9,004	9,99	6,299	6,112
Rsm [μm]	108	142	93	87

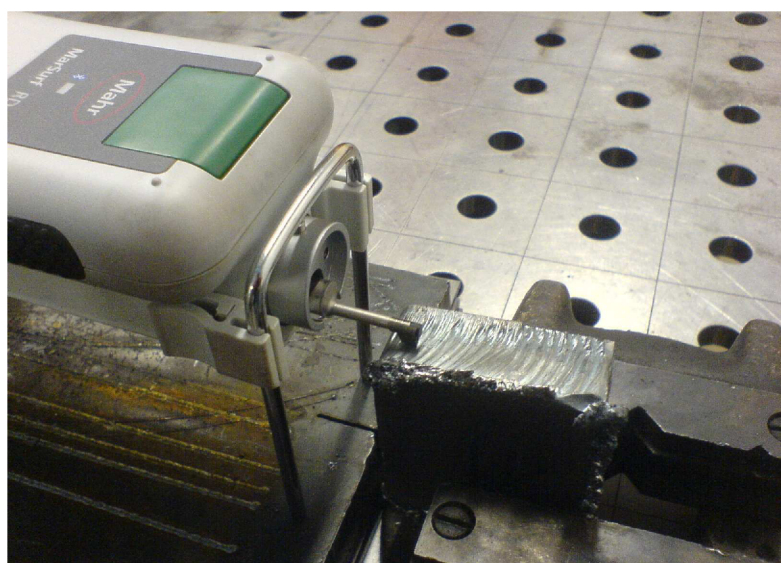
5.3 Vyhodnocení jakostí řezných ploch

Veškerá měření proběhla na půdě Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., Královopolská 147, 612 64 Brno. Všechny řezné plochy na všech řezných vzorcích i na referenčním vzorku byly změřeny za stejných podmínek na přístroji MarSurf M 300. Data z měření byla zapsána do tabulek, které byly následně zpracovány v grafy.

Upnutí vzorků bylo provedeno pomocí ručního svěráku viz obr. 37. U každého vzorku byly naměřeny hodnoty R_a , R_z a R_{sm} a to u každé řezné plochy (viz obr. 38). Drsnosti byly vyhodnoceny dle normy ČSN ISO 9013.



Obr. 37 Upevnění vzorku v ručním svěráku



Obr. 38 Měření hodnot R_a , R_z , R_{sm}

5.4 Řezné parametry

U všech vzorků byly řezné parametry zapsány do tab. 31.

Tab. 31 Řezné parametry u jednotlivých vzorků

No.	P	v	f	D	foc _{rel}	foc _{abs}	p	Pozn.
	[W]	mm.min ⁻¹	Hz	%	mm	mm	bar	
1	2900	530	660	65	+2	9	0,4	Základní režim
2	2900	530	660	65	+2	9	0,5	
3	2900	530	660	65	+2	9	0,6	
4	3100	530	660	65	+2	9	0,4	Vyšší výkon
5	3100	530	660	65	+2	9	0,5	
6	3100	530	660	65	+2	9	0,6	
7	2900	530	660	65	+3	10	0,4	Ohnisko výše
8	2900	530	660	65	+3	10	0,5	
9	2900	530	660	65	+3	10	0,6	
10	2900	530	660	65	+1	8	0,4	Ohnisko níže
11	2900	530	660	65	+1	8	0,5	
12	2900	530	660	65	+1	8	0,6	

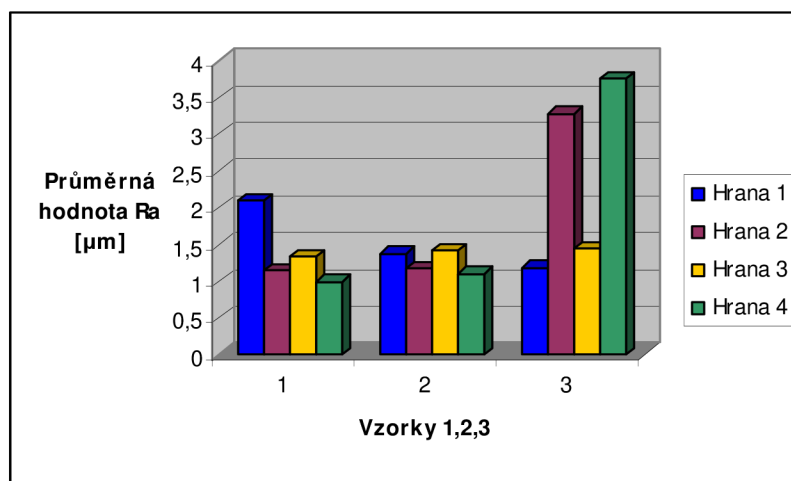
5.5 Vyhodnocení jakosti u vzorků 1, 2 a 3.

U všech těchto vzorků byl nastaven výkon na 2900W, ohnisko bylo vzdáleno 9mm a řezná rychlost činila 530 mm.min⁻¹. Proměnná u první skupiny vzorků byl tlak vzduchu. První vzorek byl řezán tlakem 0,4 bar, druhý tlakem 0,5 baru a třetí tlakem 0,6 baru.

Průměrně nejlepší aritmetické střední hodnoty drsnosti R_a dosáhl vzorek číslo 2 s hodnotou 1,2675 μ m. U vzorku 3 a tlaku 0,6 baru docházelo ke skokovým změnám na jednotlivých hranách (viz tab. 32).

Tab. 32 Aritmetické střední hodnoty R_a u vzorků 1, 2 a 3

	Hrana 1	Hrana 2	Hrana 3	Hrana 4	Prům. R_a [μ m]
Vzorek 1 R_a [μ m]	2,089	1,148	1,341	0,996	1,3935
Vzorek 2 R_a [μ m]	1,374	1,174	1,417	1,105	1,2675
Vzorek 3 R_a [μ m]	1,184	3,277	1,434	3,764	2,41475



Graf 2 Vyhodnocení jakostí řezných ploch u vzorků 1, 2 a 3

5.6 Vyhodnocení jakosti u vzorků 4, 5 a 6.

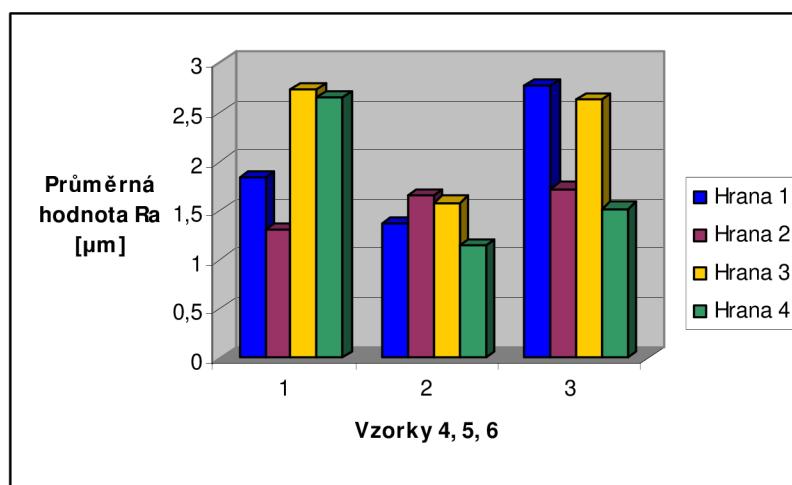
Oproti předešlé skupině vzorků byl u všech těchto vzorků nastaven výkon na 3100W, ohnisko bylo vzdáleno opět 9mm a řezná rychlost činila $530 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Proměnná u druhé skupiny vzorků zůstal tlak vzduchu.

První vzorek byl řezán tlakem 0,4 bar, druhý tlakem 0,5 baru a třetí tlakem 0,6 baru.

Průměrně nejlepší aritmetické střední hodnoty drsnosti R_a dosáhl vzorek číslo 5 s hodnotou $1,4345 \mu\text{m}$. Vzorky 4 a 6 o tlaku 0,4 a 0,6 baru vykazovaly vyšší hodnoty R_a (viz tab. 33).

Tab. 33 Aritmetické střední hodnoty R_a u vzorků 4, 5 a 6

	Hrana 1	Hrana 2	Hrana 3	Hrana 4	Prům. R_a [μm]
Vzorek 4 R_a [μm]	1,833	1,301	2,736	2,651	2,13025
Vzorek 5 R_a [μm]	1,372	1,646	1,582	1,138	1,4345
Vzorek 6 R_a [μm]	2,772	1,721	2,627	1,518	2,1595



Graf 3 Vyhodnocení jakostí řezných ploch u vzorků 4, 5 a 6

5.7 Vyhodnocení jakosti u vzorků 7, 8 a 9.

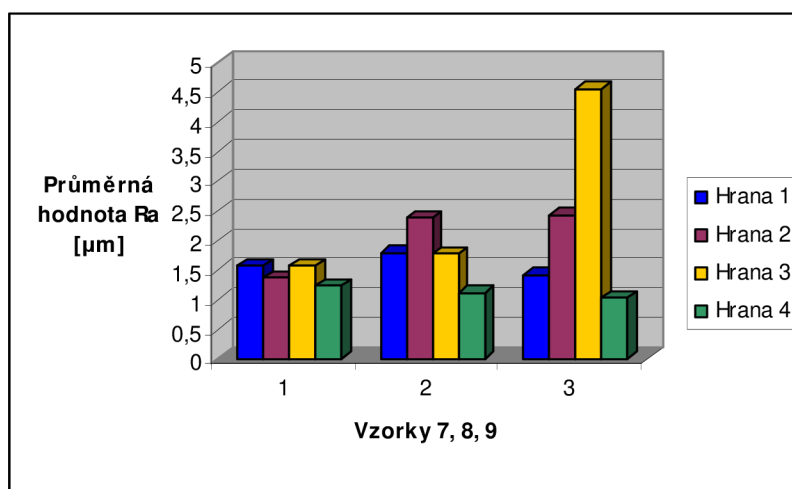
Vzhledem k vyšším hodnotám drsnosti R_a u předešlé skupiny vzorků se u vzorků 7, 8, a 9 vrátilo nastavení výkonu na hodnotu 2900W, ohnisko bylo posunuto výše o 1 mm na hodnotu 10mm a řezná rychlost činila $530 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Proměnná u třetí skupiny vzorků byl opět tlak vzduchu.

První vzorek byl řezán tlakem 0,4 bar, druhý tlakem 0,5 baru a třetí tlakem 0,6 baru.

Nejlepších aritmetických středních hodnot drsnosti R_a dosáhl vzorek číslo 7 s téměř konstantními hodnotami na všech měřených hranách. Průměrná aritmetická střední hodnota drsnosti R_a u tohoto vzorku činila $1,436 \mu\text{m}$. S narůstajícím tlakem vzduchu docházelo ke zvyšování hodnot R_a a ke skokovým změnám na jednotlivých hranách (viz tab. 34).

Tab. 34 Aritmetické střední hodnoty R_a u vzorků 7, 8 a 9

	Hrana 1	Hrana 2	Hrana 3	Hrana 4	Prům. R_a [μm]
Vzorek 7 R_a [μm]	1,567	1,365	1,581	1,231	1,436
Vzorek 8 R_a [μm]	1,795	2,376	1,778	1,121	1,7675
Vzorek 9 R_a [μm]	1,425	2,434	4,557	1,043	2,36475



Graf 4 Vyhodnocení jakostí řezných ploch u vzorků 7, 8 a 9

5.8 Vyhodnocení jakosti u vzorků 10, 11 a 12.

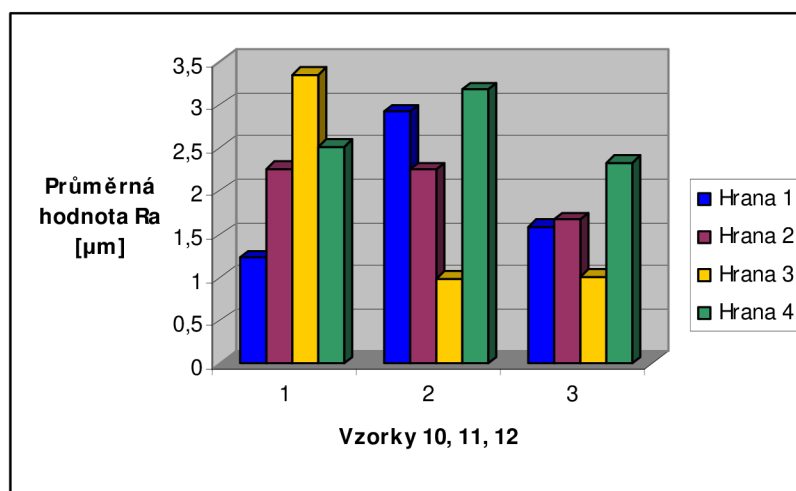
U vzorků č. 10, 11, a 12 zůstalo nastavení výkonu na hodnotě 2900W, ohnisko bylo posunuto níže na hodnotu 8 mm a řezná rychlost činila $530 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Proměnná u třetí skupiny vzorků byl opět tlak vzduchu.

První vzorek byl řezán tlakem 0,4 bar, druhý tlakem 0,5 baru a třetí tlakem 0,6 baru.

Nejlepší průměrná aritmetická střední hodnota drsnosti R_a byla dosažena u vzorku č. 12 a to $1,64625\mu\text{m}$. S narůstajícím tlakem vzduchu docházelo ke snižování hodnot R_a , ale ke skokovým změnám docházelo na všech vzorcích (viz tab. 35).

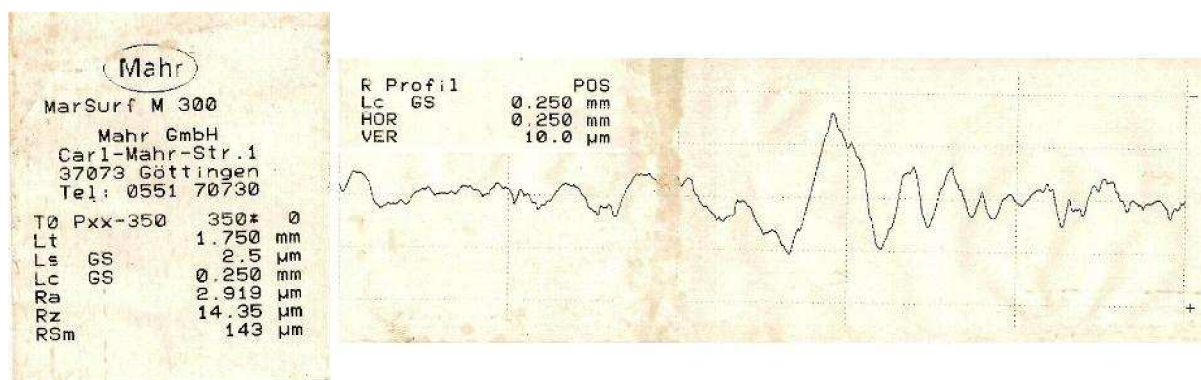
Tab. 35 Aritmetické střední hodnoty R_a u vzorků 10, 11 a 12

	Hrana 1	Hrana 2	Hrana 3	Hrana 4	Prům Ra [μm]
Vzorek 10 Ra [μm]	1,228	2,264	3,348	2,511	2,33775
Vzorek 11 Ra [μm]	2,918	2,248	0,981	3,175	2,3305
Vzorek 12 Ra [μm]	1,584	1,668	1,005	2,328	1,64625



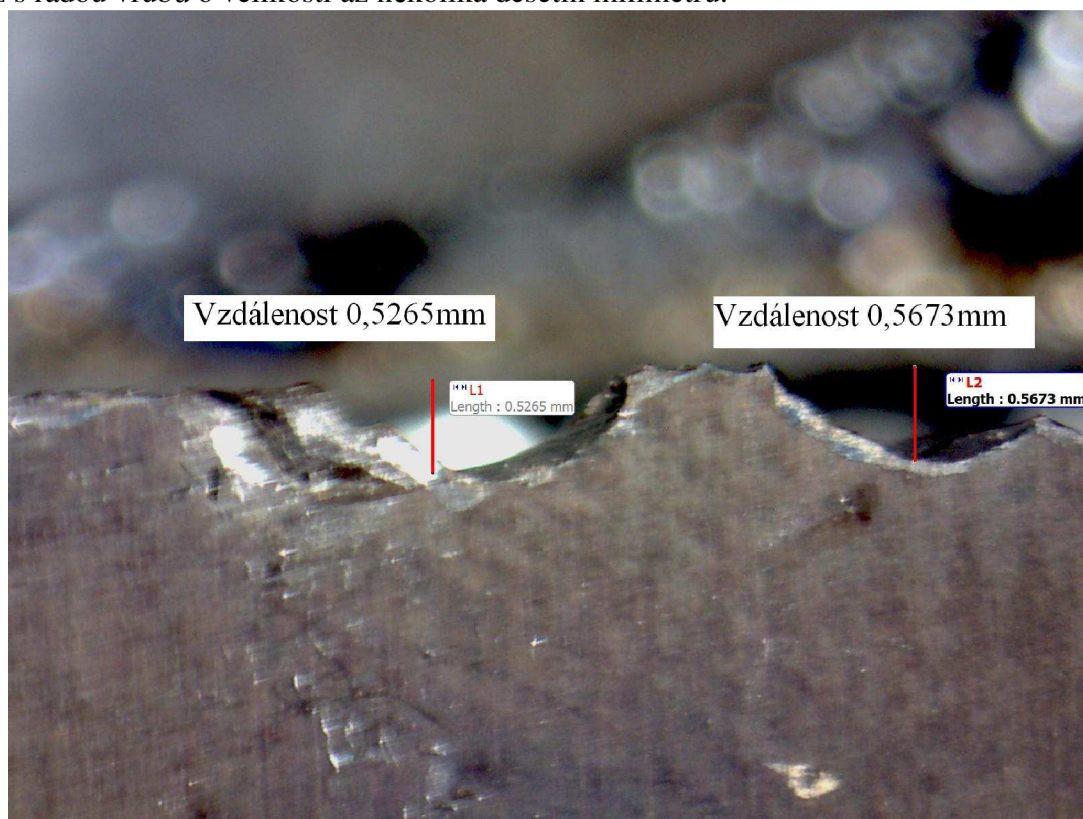
Graf. 5 Vyhodnocení jakostí řezných ploch u vzorků 10, 11 a 12

Pro vzorek č. 12 se na půdě Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., Královopolská 147, 612 64 Brno podařilo zajistit některé nadstandardní operace, umožňující lepší pochopení problematiky. V první řadě byl na ukázkou vytištěn záznam o měření drsnosti z drsnoměru MarSurf M 300 viz obr. 39, dále byl pořízen snímek první hrany pomocí mikroskopu a elektronovým mikroskopem byl proveden rozbor chemického složení a morfologie povrchu strusky na rozhraní okuje–kov.



Obr. 39 Záznam o měření drsnosti

Pro změření velikosti vrubů na první hraně u vzorku číslo 12 bylo využito mikroskopu. Parametry řezu jsou v tab. 31. Na obr. 40 lze vidět v několikanásobném zvětšení nekvalitní řez s řadou vrubů o velikosti až několika desetin milimetru.



Obr. 40 Nekvalitní řez s vruby u vzorku číslo 12

Elektronový mikroskop a jeho režimy [34]

- SE detektor – detektor sekundárních elektronů,
- BSE detektor – detektor zpětně odražených elektronů.

Na obr. 41 vodorovné řádky označují pozorovací režim – metodu v elektronovém mikroskopu, přičemž režim SE zobrazuje topografii či morfologii povrchu, a režim BSE chemické složení.

Morfologie je nauka o tvarech. Dává nám představu o tvaru povrchu jako jsou nerovnosti, kapičky, inkluze, atd.

V principu SE jsou detekovány sekundární elektrony, které jsou primárním svazkem excitované elektrony z vnějších slupek atomů odražené elektrony BSE, na které má vliv atomové jádro.

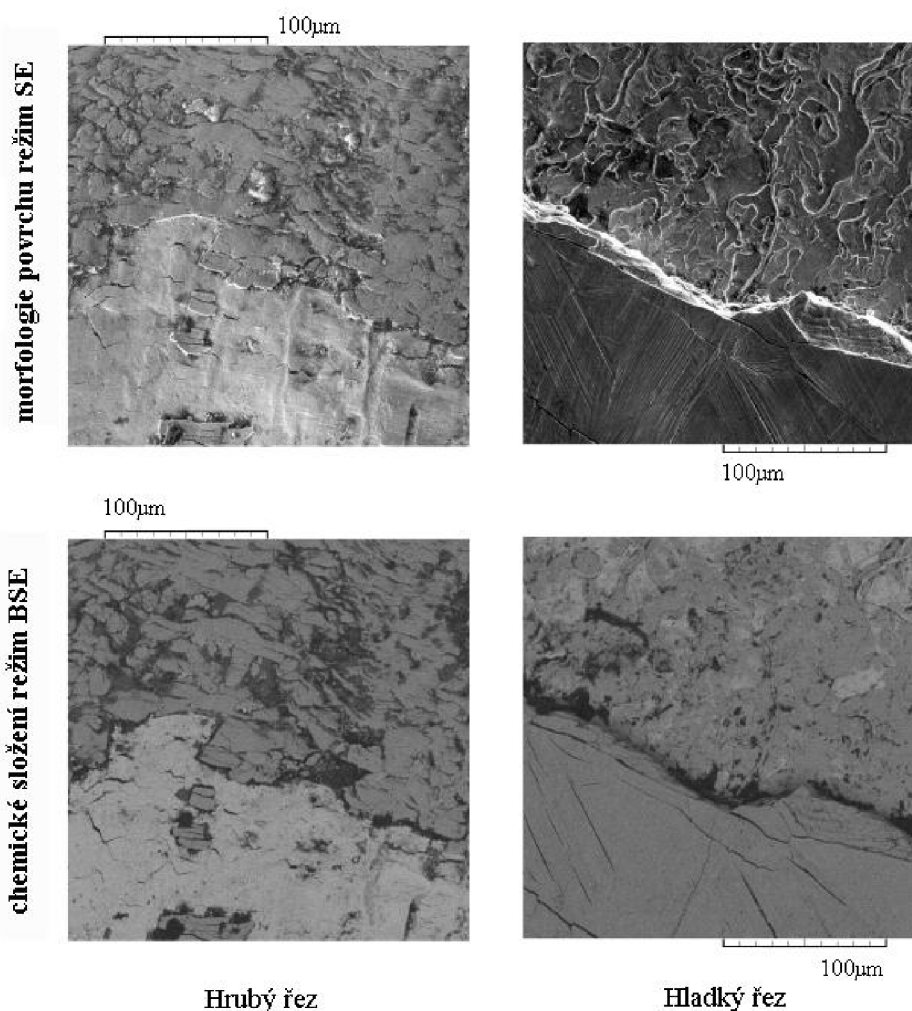
EDX (Energiově disperzní spektroskopie) [34]

EDX se používá jako přídavné zařízení k řádkovacímu mikroskopu. Smyslem kvalitativní bodové mikroanalýzy je buď v mikroobjemu o velikosti několika málo μm prokázat přítomnost určitého prvku nebo k rychlému zjištění kvalitativního složení. Při sledování vzniká rentgenové záření, jehož detekce je zajištěna energiově disperzním spektrometrem. Výstupem EDX je chemické složení snímaného povrchu.

Výhody

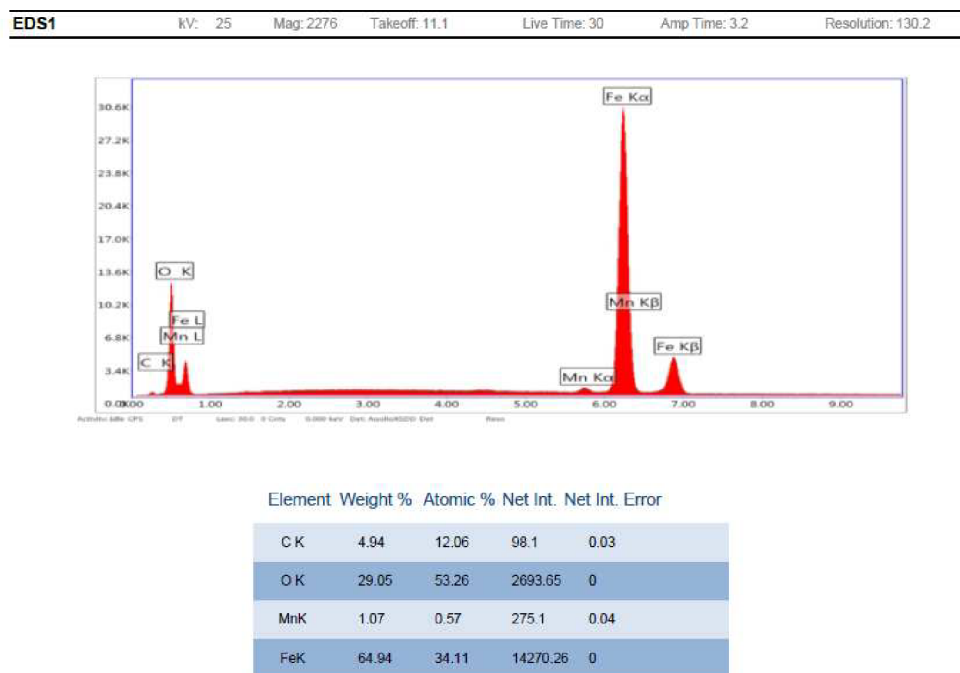
- jednoduchá na obsluhu,
- rychlé a přehledné zpracování naměřených dat,
- možnost operativně přesně srovnávat získané spektrum s polohou hlavní spektrální čáry.

Vyhodnocení pro hrubou strukturu je na obr. 42 a pro jemnou strukturu na obr. 43.



Obr. 41 Morfologie povrchu a chemické složení na rozhraní okuje – kov u vzorku číslo 12

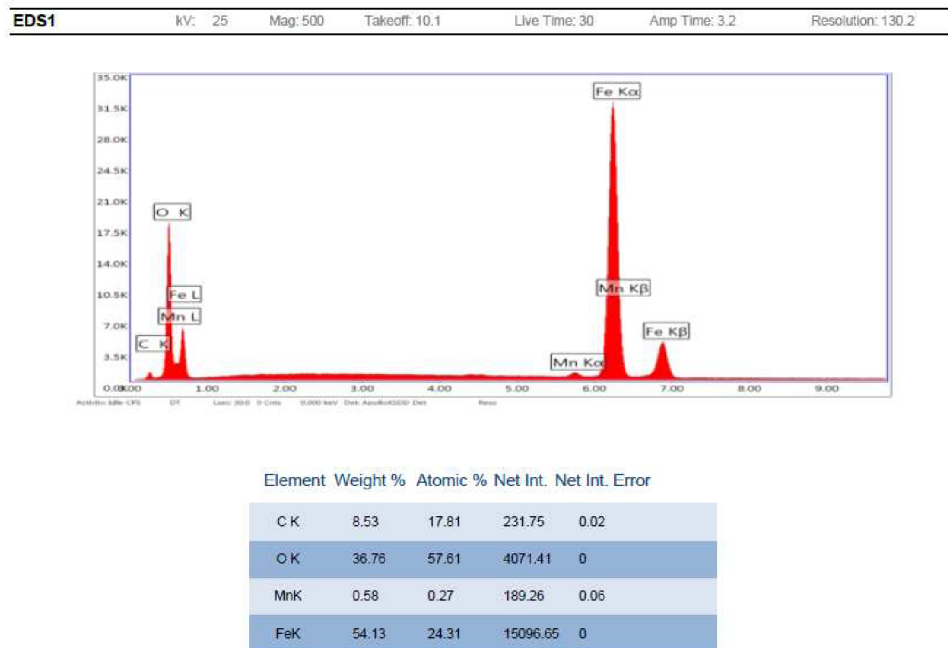
Hrubá struktura



Obr. 42 Vyhodnocení hrubé struktury u vzorku číslo 12

Vyhodnocení pro jemnou strukturu je na obr. 43.

Jemná struktura



Obr. 43 Vyhodnocení jemné struktury u vzorku číslo 12

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Vzhledem k velkému výskytu nepřijatelných řezů (cca 30%) a nákladům na materiál 17Kč/kg ztrácí firma při řezání nemalé prostředky.

Při uvažovaném rozměru plechu 1mx1mx0,02m o hmotnosti kg dle vzorce 3

$$m = \rho \cdot V \quad (3)$$

kde:

m – hmotnost [kg]

ρ – hustota [kg/m³]

V – objem [m³]

Výpočet dle vzorce 3 pro plech 1mx1mx0,02m

$$m = \rho \cdot V = 7850 \cdot 0,02 = 157\text{kg}$$

Náklady na materiál

$$N = m_p \cdot C \quad (4)$$

kde

N – náklady na 1 plech o rozměrech 1mx1mx0,02m [Kč]

m_p – hmotnost plechu [kg]

C – cena za 1kg materiálu [Kč]

Náklady na 1 plech o velikosti 1mx1mx0,02m dle vzorce 4

$$N = m_p \cdot C = 157 \times 17 = 2669\text{Kč}$$

Při ceně 17Kč za 1kg materiálu vyjde plech o rozměrech 1mx1mx0,02m o hmotnosti 157kg na částku 2669Kč.

Ztráta na jednom plechu o rozměrech 1mx1mx0,02m dle vzorce 5

$$N_z = N \cdot z \quad (5)$$

kde

N – náklady na 1 plech o rozměrech 1mx1mx0,02m [Kč]

z – zmetkovitost [-]

N_z – ztráta na 1 plechu o rozměrech 1mx1mx0,02m [Kč]

Ztráta na jednom plechu při výskytu nepřijatelných řezů (30%) dle vzorce 5

$$N_z = N \cdot z = 2669 \times 0,3 = 800,7\text{Kč}$$

Při výskytu nepřijatelných řezů o hodnotě 30% vzniká podniku nenávratná škoda 800,7Kč na každém plechu o rozměrech 1mx1mx0,02m.

7 DISKUZE

Měření vzorků na přístroji MarSurf M300 na Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., Královopolská 147, 612 64 Brno byly zjištěny hodnoty jakostí řezných ploch. Tyto hodnoty byly sepsány do tabulek a následně byly graficky zpracovány. V tabulkách jsou vypočtené i hodnoty průměrné aritmetické střední hodnoty drsnosti dle DIN EN ISO 4287. Tyto jsou následně zhodnoceny a porovnány s referenčním vzorkem.

Důležité je říci, že při měření mohlo docházet k poměrně velkým chybám, neboť délka snímané dráhy a rozsah měření byly omezené. U některých vzorků muselo probíhat měření několikanásobně a na lepších plochách řezu. Například u vzorku číslo 2 na první hraně byla naměřena hodnota $R_a = 1,374 \mu\text{m}$ a na hraně 3 hodnota $R_a = 1,417 \mu\text{m}$, ale na první pohled je zřejmé, že jakost u hrany číslo 3 je kvalitnější.

Všechna měření jakostí proběhla cca v polovině řezaného materiálu (v našem případě 10mm)

Při měření u vzorků 10, 11 a 12 je třeba si všimnout zvláštností u třetích hran. Tyto řezné plochy vykazovaly vyšší jakosti povrchů a to řádově až v jednotkách mikrometrů. Při samotném procesu řezu ovšem nebyly měněny ani řezné parametry ani manipulováno s jinými parametry, které by mohly mít za následek tuto změnu. Domnívám se, že tento jev mohl nastat při změně směru řezacího paprsku a souvisí s fyzikálními vlastnostmi paprsku.

Za zmínku stojí také to, že optimální nastavení řezných parametrů je specifické pouze pro ocel RAEX 250. U jiných ocelí, hliníku, mědi, atd. je potřeba provést novou optimalizaci.

7.1 Návrhy pokračování řešení

Skokovou změnou jako takovou se zabývá množství odborníků po celém světě, ale dodnes nikdo nepřišel s jasným řešením, proč náhlá změna vzniká a jak ji odstranit. Pravděpodobnou variantou řešení se zdá zamezení kolísání hodnoty záření spojené s nestabilním výkonem laseru.

8 ZÁVĚR

V této diplomové práci byla experimentálně zjišťována oblast, kdy nedochází k náhodné skokové změně jakosti u řezné plochy. Dle zadání byla použita uhlíková konstrukční ocel (obchodní označení RAEX 250) o tloušťce 20mm ve formě plechu. Tato ocel byla vybrána s ohledem na firmu Dendera a.s. se sídlem v Kanicích 104, jelikož právě u této oceli docházelo k velkým ekonomickým ztrátám vzhledem k velkému výskytu neshodných výrobků. Experiment byl prováděn na CO₂ laseru AMADA FO3015NT ve firmě Dendera a.s. Následné měření jakostí řezných ploch bylo prováděno na půdě Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., Královopolská 147, 612 64 Brno.

V samotném experimentu byl kladen důraz na hlavní parametry ovlivňující jakost řezné plochy a to: výkon laserového paprsku, poloha ohniska vůči řezanému materiálu, řezná rychlost a tlak vyfukovacího plynu. Tyto hodnoty vstupovaly do experimentu jako proměnné.

V závislosti na těchto proměnných bylo vyřezáno dvanáct vzorků, které byly podrobeny měření jakosti na řezných plochách a výsledky těchto měření byly dále zpracovávány a vyhodnocovány. Nejlepších výsledků jakosti, v porovnání s referenčním vzorkem, dosáhl vzorek řezaný při následujících parametrech (jedná se o vzorek číslo 2):

- výkon laseru 2900W,
- ohnisková vzdálenost 9mm,
- řezná rychlost 530 mm.min⁻¹
- tlak vyfukovacího plynu 0,5bar

Při snižování nebo zvyšování tlaku vyfukovacího plynu u dalších vzorků se stejnými parametry docházelo postupně ke zhoršování jakosti řezné plochy.

Další skupina vzorků se zvýšeným výkonem laseru na hodnotu 3100W dosahovala špatných výsledků jakostí řezných ploch především díky velkým skluzovým rýhám a vytavenému materiálu.

Po vrácení výkonu laseru na hodnotu 2900W bylo nastaveno ohnisko dále od řezaného materiálu, což mělo za následek kvalitnější řez v horní polovině děleného materiálu, ovšem ve spodní části docházelo ke zhoršení jakosti a tvorbě výrazných otřepů.

Nastavení ohniska blíže k řezanému materiálu se projevilo velkými vruby (až několik desetin milimetru) na vrchní hraně řezané plochy, nízkou jakostí i otřepů.

Skokové změny při řezání laserem vznikají v důsledku nestabilního výkonu laseru, kde se hodnoty záření mohou lišit až v rozmezí $\pm 30\%$. Následně při vyšší hodnotě záření se mód stává nerovnoměrným. Díky exotermické reakci vzniká v prostoru řezu tzv. „kyslíkový požár“, který vnáší mezi dělený materiál až 3x více tepla a dochází k vytavování kovu a následnému zatavení na dolní hraně a vznik otřepů. Tento jev je dobře patrný z elektronového mikroskopu v režimu BSE a provedeného chemického složení. Tyto vlastnosti způsobují nekvalitní a široký řez.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BENKO B., FODEREK P., KOSECEK M., BIELAK R.I.: Laserové technologie, 1. vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
- [2] Laserart.wbs.cz [online]. 2009-03-26 [cit. 2012-03-10]. Historie laseru. Dostupné z WWW: <http://www.laserart.wbs.cz/Historie_laseru.html>
- [3] SINOR, Milan; DRSKA, Ladislav. Virtuální katedra fyzikálních věd a inženýrské pedagogiky [online]. 241000. 2001 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z WWW: <<http://vega.fjfi.cvut.cz/vegacont.htm>>.
- [4] spie.org. [online]. [cit. 2012-02-23]. Dostupné z: <http://spie.org/x39920.xml>
- [5] JetLasers [online]. 2010 [cit. 2012-02-23]. JetLasersBlog. Dostupné na WWW: <<http://www.jetlasers.net/blog/green%20lasers,%20red%20lasers%20and%20blue%20lasers/diode-lasers>>.
- [6] lasery.wz.cz. [online]. [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/princip.html>
- [7] MINAŘÍK, Václav. Česká svářečská společnost ANB [online]. 2007-12-29 [cit. 2012-04-03]. Technologické lasery. Dostupné na WWW: <<http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>>.
- [8] MRŇA, Libor. Technologie využívající laser. Prezentace pro podporu výuky předmětu: Speciální technologie svařování. VUT v Brně, FSI, 2010. 22. s. [cit. 2012-03-13].
- [9] infrared.cz. *Lasery* [online]. [cit. 2012-03-12]. Dostupné z: <http://www.infrared.cz/Technologie/Lasery/>
- [10] Kovoplazma.cz [online]. 2001-12-04 [cit. 2012-03-17]. Strojní park. Dostupné z WWW: <<http://www.kovoplazma.cz/park.php>>.
- [11] Lao.cz. *Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/serial-princip-a-typy-laseru.htm>
- [12] PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. VUT v Brně, FSI: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [13] Www.isibrno.cz: Laditelný polovodičový laser s externím rezonátorem. [online]. [cit. 2012-04-11]. Dostupné z: http://www.isibrno.cz/kgs/index.php?menu=ecl&prep_lang=cz
- [14] Medicom.cz: LF20C laser. [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: http://www.medicom.cz/p.php?p=prumyslove_produkty_popis_laser.lf20c.laser
- [15] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresivně technologie: Advanced methods of material removal*. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [16] ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonenční metody obrábění – 4.díl. MMPS [online]. 2008-03, 080304, [cit. 2012-05-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-4-dil>>.

- [17] MRŇA, Libor. Vliv optických vlastností paprsku na geometrii řezu : K číslo. Ing. MRŇA, Libor. Fyzika-dělení. Brno : [s.n.], 2008. s. 3.
- [18] Laser processing : Technical information [online]. Ditzingen : TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, 2007-02 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.trumpf.com>>.
- [19] [Http://www.ailu.org.uk](http://www.ailu.org.uk). *Cutting* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://www.ailu.org.uk/laser_technology/information_sheets/process/information_sheet_-_cutting.html
- [20] [Http://www.stellite.co.uk](http://www.stellite.co.uk): Laser Welding. *Cutting* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.stellite.co.uk/WeldingProcesses/LaserWelding/tabid/74/Default.aspx>
- [21] [Http://www.atryx.cz](http://www.atryx.cz): Drsnost povrchu. *Cutting* [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.atryx.cz/prakticka-prirucka/drsnost-povrchu/>
- [22] [Http://laser.zcu.cz](http://laser.zcu.cz): Rozdělení laserů. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z:
- [23] [Http://www.stematech.cz](http://www.stematech.cz): Laser FO 3015. [online]. [cit. 2012-04-18]. Dostupné z: <http://www.stematech.cz/lasery/laser-fo-3015>
- [24] [Http://www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com): Nekonenční metody obrábění – 5. díl. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
- [25] VOJTA, Filip. Princip laseru [online]. [s.l.], 2003. 8 s. Seminární práce. Pedagogická fakulta Jihočeské univerzity. Dostupné z WWW: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>
- [26] PASCHOTTA, Rüdiger. Rp-photonics.com [online]. 2009-07-09 [cit. 2012-05-10]. Encyclopedia of Laser Physics and Technology. Dostupné z WWW: <<http://www.rpphotonics.com/modes.html>>.
- [27] TŘEŠŇÁK, Kamil. Printing.cz [online]. 2001-02-09 [cit. 2012-05-14]. Principy laserů a jejich rozdělení. Dostupné z WWW: <http://www.printing.cz/art/ctp/ctp_principy_laseru.html>.
- [28] Laserové a plazmové řezání [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010-01-12 [cit. 2012-05-114]. Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>>.
- [29] ZATLOUKAL, Petr. Welding.cz [online]. Brno : 2007-05-10 [cit. 2012-04-20]. Laserové dělení materiálu. Dostupné z WWW: <<http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>>.
- [30] ŘASA, Jaroslav ; KEREČANINOVÁ, Zuzana. Obrábění paprskem fotonů – laserem [online]. 2008 [cit. 2012-04-05]. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>
- [31] [Http://dp.bajaja.net](http://dp.bajaja.net): N5. LASEROVÉ ZPRACOVÁNÍ MATERIÁLŮ. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://dp.bajaja.net/05.html>

- [32] ČSN EN ISO 9013. Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu . Praha : Český Normalizační Institut, 2003-10. 28 s.
- [33] [Http://www.ruukki.cz](http://www.ruukki.cz): Ocel Raex odolná proti opotřebení. [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.ruukki.cz/Produkty-a-reseni/Hutni-materialy/Oceli-valcovane-za-tepla/Oceli-odolne-proti-opotrebeni/Ocel-Raex-odolna-proti-opotrebeni>
- [34] [Http://www.chempoint.cz](http://www.chempoint.cz): Vidět znamená vědět – elektronová mikroskopie. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/videt-znamenavedet>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
BSE	[-]	zpětně odražené elektrony
EDX	[-]	energy-dispersive X-ray
HDL	[-]	high-power diode
IR	[-]	infrared (infračervený)
LASER	[-]	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření)
Nd:YAG	[-]	neodym ytrium-alumin granát
SE	[-]	sekundární elektrony
TEM	[-]	transverzální elektromagnetický mód
UV	[-]	ultraviolet (ultrafialový)

Symbol	Jednotka	Popis
A₅	[%]	tažnost
D	[%]	duty
E	[MPa]	modul pružnosti
G	[MPa]	modul pružnosti ve smyku
K	[-]	šířící faktor paprsku
P	[W]	výkon
R_a	[μm]	aritmetická střední úchylka profilu
R_m	[MPa]	pevnost v tahu
R_{p0,2}	[MPa]	mez průtažnosti
R_{sm}	[μm]	střední šířka elementů profilu
R_z	[μm]	největší výška profilu
SPP	[mm·mrad]	parametr paprsku
T_{mp}	[°C]	bod tavby
c	[kJ/kg°K]	tepelná kapacita

f	[Hz]	frekvence
foc_{abs}	[mm]	vzdálenost ohniska absolutní
foc_{rel}	[mm]	vzdálenost ohniska relativní
p	[bar]	tlak
v	[mm.min ⁻¹]	řezná rychlost
θ	[mrad]	úhel divergence ve vzdáleném poli
α	[1·°K ⁻¹]	koeficient tepelné roztažnosti
λ	[W·m ⁻¹ °K ⁻¹]	tepelná vodivost
ν	[-]	poissonovo číslo
π	[-]	Ludolfovo číslo
ρ	[kg·dm ⁻³]	hustota
ω	[mm]	průměr paprskového pásu

