VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM VLIVU PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA DRSNOST ŘEZU PŘI TAVNÉM REŽIMU LASEROVÉHO DĚLENÍ AUSTENITICKÉ KOROZIVZDORNÉ OCELI

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON THE ROUGHNESS OF THE CUT FOR FLAME LASER CUTTING OF STAINLESS STEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Václav Kučera
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Václav Kučera**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok:	2015/16

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

Studium vlivu procesních parametrů na drsnost řezu při tavném režimu laserového dělení austenitické korozivzdorné oceli

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Změřit drsnost řezu na daných vzorcích, prostudovat, jak se mění drsnost v závislosti na změně základních procesních parametrů, jako je výkon laseru, řezná rychlost, tlak řezného plynu.

Cíle bakalářské práce:

- Osvojit si základy technologie tavného řezání pevnolátkovým laserem.
- Osvojit si techniku měření drsnosti řezu kontaktním měřidlem.

Seznam literatury:

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l.: Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateĺstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s.I SBN 80-85771-81-0.

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214 s. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně dne

L. S.

.....	.....
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
ředitel ústavu	děkan fakulty

ABSTRAKT

KUČERA Václav: Studium vlivu procesních parametrů na drsnost řezu při tavném režimu laserového dělení austenitické korozivzdorné oceli.

Práce předkládá studium vlivu procesních parametrů na drsnost řezané plochy. Zkoušený materiál je 1.4301, tedy austenitická korozivzdorná ocel. Při změně parametru se drsnost povrchu příliš nezměnila. U některých vzorků se objevily vady řezu v podobě otřepů. V grafech jsou znázorněna předpokládaná minima pro změnu jednoho parametru (nejnižší bod křivky). Jako nejdůležitější parametr z technologického hlediska je řezná rychlost, která tvoří větší položku nákladů oproti pomocným plynům a výkonu. U vzorků s tloušťkou 2 a 3 mm bylo dosaženo dobrých výsledků u poklesu řezné rychlosti o 30 % procent, i když při jejich řezání výchozí rychlostí bylo dosaženo téměř totožných výsledků. U vzorků s tloušťkou 3 mm bylo dosaženo nejlepších výsledků zvýšením rychlosti o 30 %, pokles rychlosti nutno porovnat s ekonomikou procesu vůči snížení drsnosti. U změny tlaku plynu bylo dosaženo nejlepších hodnot při navýšení tlaku o 30 %. Při změně výkonu se nejlepších výsledků dosáhlo nastavením 100–90% výkonu.

Klíčová slova: Laser, řezání, drsnost, procesní parametry, laserový paprsek

ABSTRACT

KUČERA Václav: The study of the influence of process parameters on the roughness of the cut for flame laser cutting of stainless steel.

Thesis presents a study of the influence of process parameters on the roughness of the cut surface. The test material is 1.4301, namely austenitic stainless steel. When a parameter is the surface roughness not change too much. In some samples there were defects in the form of cutting burrs. The graphs below show the estimated minimum change one parameter (the lowest point of the curve). As the most important parameter from a technological point of view, cutting speed, constitutes a major cost item compared to the auxiliary gas and power. For samples with a thickness of 2 mm and 3 mm has been achieved good results with decrease in the cutting rate of 30% percent, although when cutting the samples with a default rate was almost identical results. For samples with a thickness of 3 mm the best results were achieved by increasing the speed by 30 %, decrease the rate should be compared with the economy of the process to reduce surface roughness. For changes in the gas pressure was achieved the best values at a pressure increase of 30 %. When you change the performance of the best results are achieved by setting 100–90 % capacity.

Keywords: Laser, cutting , roughness , processing parameters , the laser beam

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUČERA, Václav. *Studium vlivu procesních parametrů na drsnost řezu při tavném režimu laserového dělení austenitické korozivzdorné oceli*. Brno, 2016. 43 s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V …… dne 27. 5. 2016

……

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Děkuji také své rodině za podporu během studia.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah Str.

ÚVOD ... 9

1 ROZBOR ZADÁNÍ ... 10

2 LASER ... 11

2.1 Princip a hlavní části ... 11

2.2 Vlastnosti laserového paprsku ... 13

2.3 Rozdělení laserů ... 14

2.3.1 Pevnolátkové ... 15

2.3.2 Plynové – CO_2 laser ... 17

2.4 Porovnání průmyslových laserů ... 18

2.5 Operace pomocí laseru ve strojírenství ... 19

3 TECHNOLOGIE DĚLENÍ MATERIÁLU ... 21

3.1 Řezání laserem ... 21

3.2 Režimy laserového řezání ... 22

3.3 Další metody – plazma, kyslík, vodní paprsek ... 23

3.4 Řezné parametry a vady řezu ... 24

4 VLASTNÍ EXPERIMENT ... 28

4.1 Měření drsnosti a norma ČSN EN ISO 4287 ... 28

4.2 Norma ČSN EN ISO 9013 ... 29

4.3 Kontaktní měření drsnosti ... 30

4.4 Vlastní měření ... 31

4.5 Zpracování a vizualizace dat ... 32

4.6 Makro fotky ... 37

4.7 Charakteristika materiálu ... 38

5 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ ... 39

6 DISKUZE A ZÁVĚRY ... 43

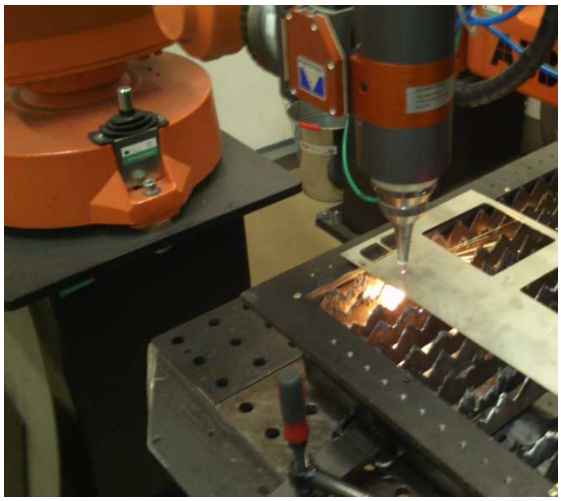
Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratek
Seznam obrázků
Seznam tabulek

ÚVOD [42], [15]

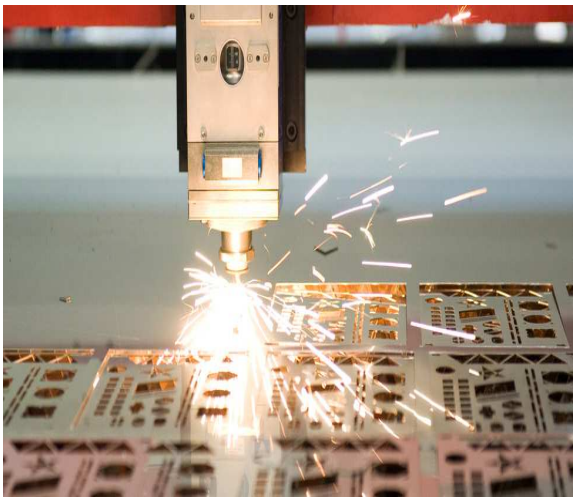
V současné době se pro dělení materiálu v průmyslu stále více využívá nekonvenčních technologií. Nedochází zde k úběru materiálu mechanickou prací, ale za pomoci fyzikálně – chemických principů. Rozvoj nekonvenčních technologií je nutný, protože stále rostou požadavky na kvalitu, kvantitu a ekologii výroby. V neposlední řadě je kladen důraz na nízké provozní a výrobní náklady, což se projeví na snížení ceny výrobku. Tato problematika v okruhu zadané práce zahrnuje několik metod dělení materiálu, jako je řezání plamenem, laserem, plazmou a vodním paprskem.

Laser jako takový se vyvíjí mnoho desítek let. Jeho aplikace pronikly do širokého spektra lidské činnosti. Z toho je patrné, že se hlouběji či okrajově dotýká téměř všech oborů. Avšak použití laseru v průmyslu v širším měřítku není dlouhodobou záležitostí, jelikož lasery nedosahovaly potřebných výkonů a celkové odolnosti vůči prostředí. Z vyplývajících potřeb a podmínek pro každé prostředí se uplatňují určité druhy laserů, které dosahují v dané aplikaci nejlepších výsledků. Nejrozšířenější aplikací laseru ve strojírenství je řezání. Mezi jeho další aplikace ve strojírenství můžeme zařadit svařování, vrtání, povrchové úpravy a další. Lze předpokládat, že díky technologickému a vědeckému pokroku se rozšíří spektrum použití laserů vhodných pro průmyslové využití. Klesají pořizovací náklady, vznikají nové typy laserů, zvyšuje se spolehlivost a odolnost, tím dochází k snazšímu zavedení technologie do výroby.

Tato práce se bude zabývat dělením materiálu pomocí laseru. Mimo jiné čtenáře seznámí se základy laserové technologie, rozdělení laserů a kontaktním měřením drsnosti. Hlavním tématem je vliv řezných (procesních) parametrů na drsnost povrchu při laserovém řezání. Procesní parametry silně ovlivňují kvalitu řezu a ekonomiku procesu. Pro technologa představují hodnoty, které nastavuje (předepisuje), aby dosáhl potřebných výsledků. V bakalářské práci bude proveden experimentální výzkum vlivu procesních parametrů na drsnost řezné plochy. Graficky stanovíme jejich závislosti a vyvodíme závěry. Tento výzkum provádíme, protože nás zajímá optimální nastavení laseru pro co nejkvalitnější řez, vyšší produktivitu práce a ekonomiku procesu. Na obrázku 1 je zachyceno řezání vzorků a na obrázku 2 je vyobrazen ilustrativní příklad řezání laserem.



Obr. 1 Řezání vzorků.



Obr. 2 Ilustrativní obrázek. [21]

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Studium vlivu procesních parametrů provádíme z toho důvodu, že mají rozhodující vliv na kvalitu řezu. Parametry jako např. řezná rychlost také ovlivňují produktivitu práce, ale i zvýšení tlaku plynu nám umožňuje řezat rychleji. Optimální nastavení procesních parametrů hledáme, protože je neznáme a protože doporučené parametry většinou neodpovídají skutečnosti. Experimentálně bude zjištěna závislost procesních parametrů na drsnost řezu. Vyhodnocovat budeme základní parametry jako výkon laseru, řezná rychlost a tlak pomocného plynu. U laserového dělení materiálu existuje více parametrů, které ovlivňují provedený řez. Dělení materiálu bude provedeno na pevnolátkovém vláknovém laseru v tavném režimu. Materiál, pro který bude stanovena závislost, je austenitická korozivzdorná ocel. Obsluha laserového zařízení nařeže 3 sady vzorků, přičemž každá obsahuje minimálně 15 vzorků. Každý vzorek je nařezán s jinými hodnotami procesních parametrů. První vzorek v každé sadě je nařezán s výchozím nastavením parametrů pro svoji tloušťku. U následujících vzorků je vždy změněn, v desítkách procent výchozí hodnoty jeden parametr, ať už zvýšením, nebo sníženým hodnoty parametru. Sada 1 obsahuje vzorky o tloušťce materiálu 1 mm, sada 2 zahrnuje vzorky o síle 2 mm, v poslední sadě jsou vzorky připraveny z materiálu o síle 3 mm. Provedeme kontaktní měření drsnosti. Výsledkem této práce je zjištění závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu řezu, osvojení základů technologie tavného řezání pevnolátkovým laserem a získání praktických zkušeností s měřením drsnosti řezu kontaktním měřidlem.

2 LASER [32], [28], [42], [33], [36]

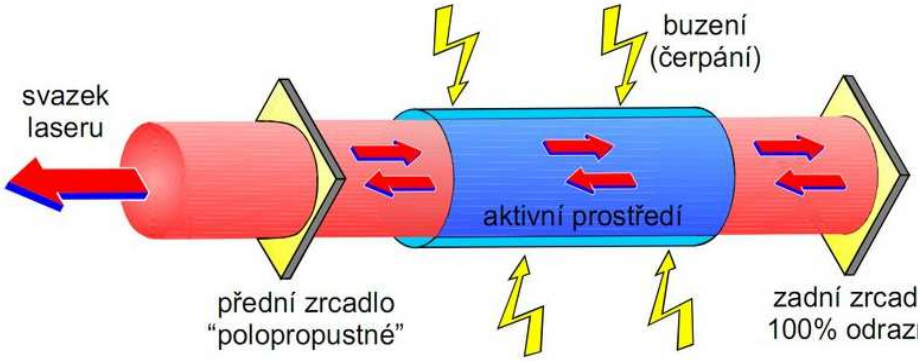
Výraz „LASER“ je akronymum vycházející z anglického popisu děje „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což lze do češtiny přeložit jako zesílení světla stimulovanou emisí záření. Jednodušeji lze říci, že laser můžeme považovat za optický zesilovač, který generuje světlo za pomoci pochodu stimulované emise fotonů. Základy vycházející ze zákonů kvantové fyziky a termodynamiky pro vznik a rozvoj laserového paprsku byly položeny na začátku 20. století. První laserový efekt je datován k roku 1960. Poté se laserové aplikace rozšiřovaly do fyzikálního prostředí, medicíny, holografie, přenosu informací až do průmyslu v podobě výkonných laserů. Použití laseru v průmyslu bylo dlouho považováno za obtížně dosažitelné, protože lasery neměly dostatečný výkon. Poté, co vývoj překonal toto omezení, rozšířil se do široké oblasti průmyslu. Na obrázku 3 a 4 jsou vyobrazeny dnešní podoby laserů používaných ve strojírenství.

Obr. 3 2D pálení laser. [34]

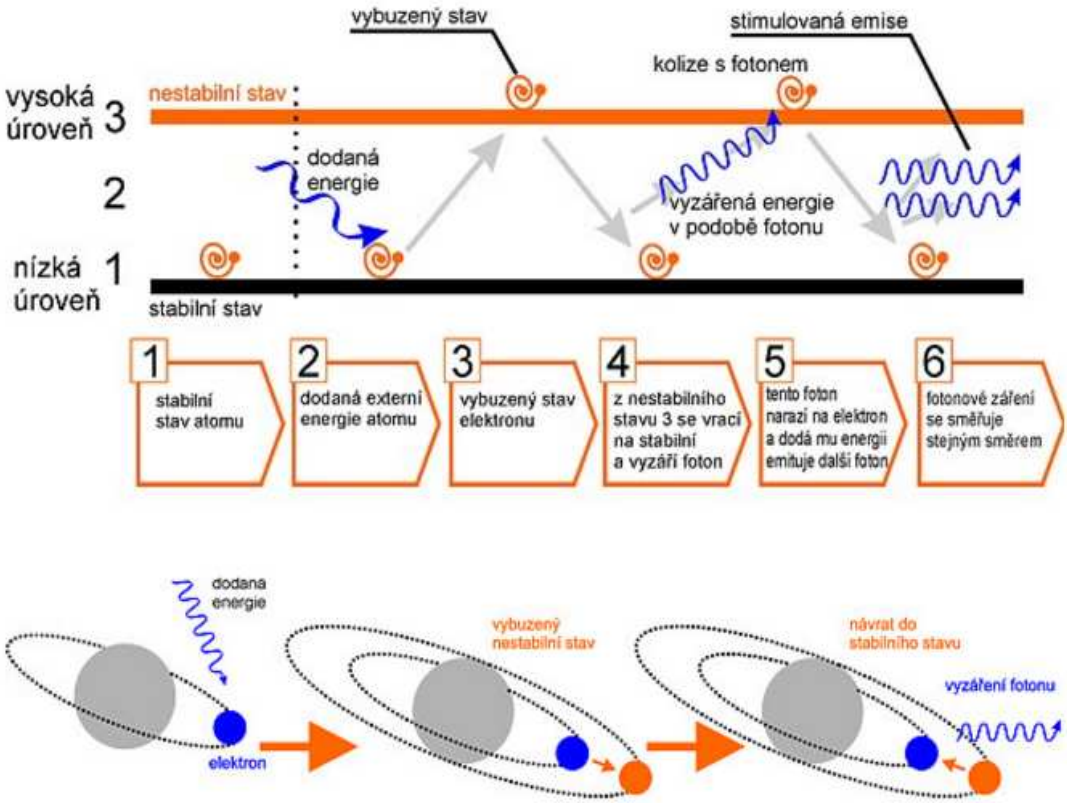
Obr. 4 3D laser robot. [18]

2.1 Princip a hlavní části [32], [27], [4], [16]

Princip laseru je z fyzikálního hlediska složitý, využívá mnoho poznatků, jako je interakce fotonu a atomu aktivního prostředí (zobrazeno na obrázku 6). Základním principem laseru je stimulovaná emise fotonů v aktivním prostředí. V aktivním prostředí jsou za normálních podmínek atomy, ionty nebo molekuly v nejnižší energetické hladině. Dojde-li k excitaci (vybuzení) do vyšších energetických hladin vnějším zdrojem energie (buzení), při přechodu do základní energetické hladiny začnou atomy vyzařovat nekoherentní elektromagnetické záření neboli světlo. Nutnou podmínkou ke vzniku stimulované emise je stav inverzní populace. To je stav, při kterém došlo k obsazení energetických hladin částicemi, které neodpovídá rovnovážnému rozdělení. Tohoto stavu docílíme intenzivním buzením a odrazy v optickém rezonátoru. Stimulovaná emise je stav vyvolaný dopadajícím zářením za současného přechodu soustavy z excitovaného stavu do základního. K zajištění směru laserového záření se využívá tzv. optický rezonátor, který je umístěn v aktivním prostředí. Rozumí se jím dutina obklopená odrazovými plochami v aktivním prostředí. Jakmile se svazek fotonů zesílí na určitou úroveň, polopropustné zrcadlo ho vypustí ven. Schematické uspořádání částí laseru na obrázku 5.



Obr. 5 Základní schéma laseru. [32]



Obr. 6 Fyzikální princip laseru. [35]

Hlavní části laseru – Pochopitelně každý typ laseru má svoji specifickou konstrukci a odlišnou skladbu součástek. U každého typu ovšem najdeme tři základní části, a to aktivní prostředí, buzení a optický rezonátor.

- Aktivní prostředí – látka obsahující oddělené kvantové energetické hladiny elektronů, na nichž přeskakují atomy z nižší na vyšší energetickou hladinu, poté na metastabilní a na nižší energetickou hladinu. Aktivní prostředí tvoří plyny, polovodiče, krystaly, kapalina, optické vlákno a další.

- Zdroj buzení – buzením dodáváme do aktivního prostředí energii, aby se atomy mohly přesouvat mezi energetickými hladinami. Zdroji mohou být světelné záblesky (optické), elektrický proud, chemická reakce a podobně.

- Optický rezonátor – soustava dvou vzájemně rovnoběžných zrcadel ohraničující aktivní prostředí. Jedno zrcadlo je nepropustné s téměř stoprocentní odrazivostí a druhé polopropustné, přes které vychází laserový paprsek ven. Fotony se v rezonátoru odráží zpět do aktivního prostředí, kde způsobují další emise. Dosáhne-li paprsek kritického množství, opustí aktivní prostředí přes polopropustné zrcadlo. Odrazy zesilují záření.

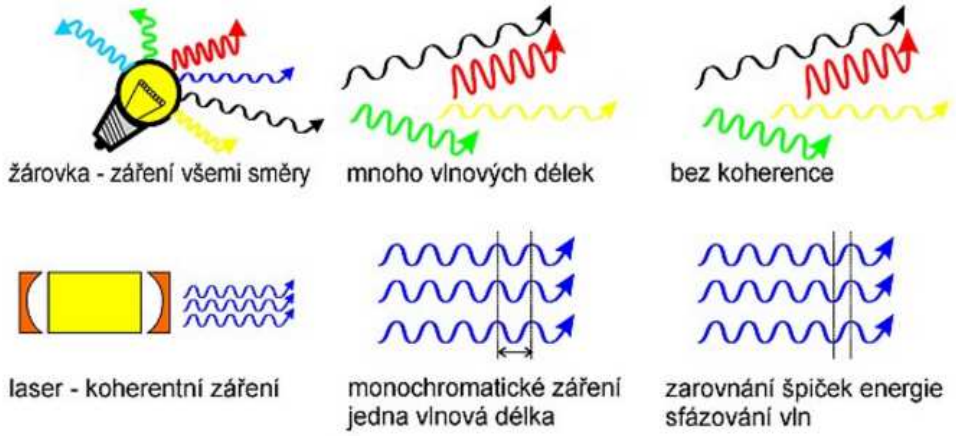
2.2 Vlastnosti laserového paprsku [32], [42]

Laserový paprsek má své unikátní specifické vlastnosti. Jedinečnost technologie spočívá v tom, že při procesu stimulované emise má dopadající i emitovaný foton stejnou energii (frekvenci), stejný směr, polarizaci a fázi. Z toho zjištění nám vyplývá několik zásad.

Svazek laseru je:

- Kolimovaný – tj. nerozbíhá se, záření ve formě úzkého paprsku.
- Monochromatický – paprsek má jednu barvu.
- Koherentní – vychází jedna synchronizovaná vlna.
- Zaostření svazku do bodu (malou plošku).
- Záblesk je krátký 0,000 000 000 000 001 s.

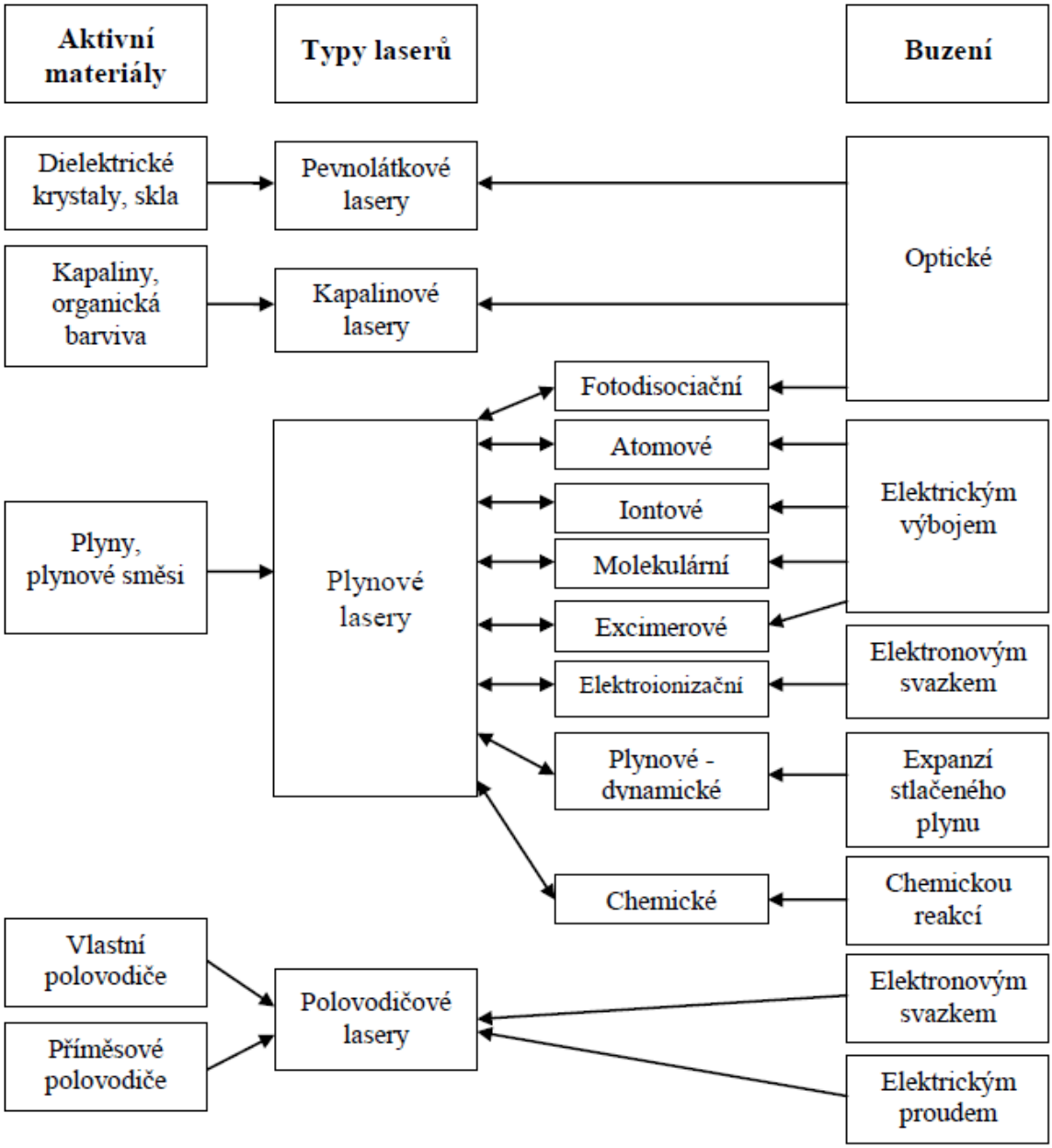
Opakem laseru je klasický zdroj světla, klasická žárovka, která generuje záření chaoticky (obrázek 7). Paprsek je nekoherentní, o různých vlnových délkách a náhodnou fází. V průmyslu využíváme možnost zaostřit (fokusace) paprsek do malé plošky a tím dosáhnout dostatečně velké hustoty energie nutné k obrobení materiálu.



Obr. 7 Rozdílné vlastnosti paprsku světelných zdrojů. [35]

2.3 Rozdělení laserů [6], [4], [28], [36], [32], [27], [47], [35]

Rozdělení a bližší specifikace uvedených laserů se bude týkat jenom laserů používaných ve strojírenství. Souhrnně je můžeme označit jako průmyslové lasery. Mají svoje specifika jako vysoký výkon a vysokou odolnost vůči náročným provozním podmínkám, jimiž rozumíme nepřetržitý provoz, prašné a znečištěné prostředí, náročné teplotní podmínky (změny teplot a vysoké teploty), otřesy a podobné zatížení vznikající při provozu. Schematické rozdělení je na obrázku 8. V práci bude blíže popsán jednak velice rozšířený plynový CO_2 laser a pevnolátkové lasery.



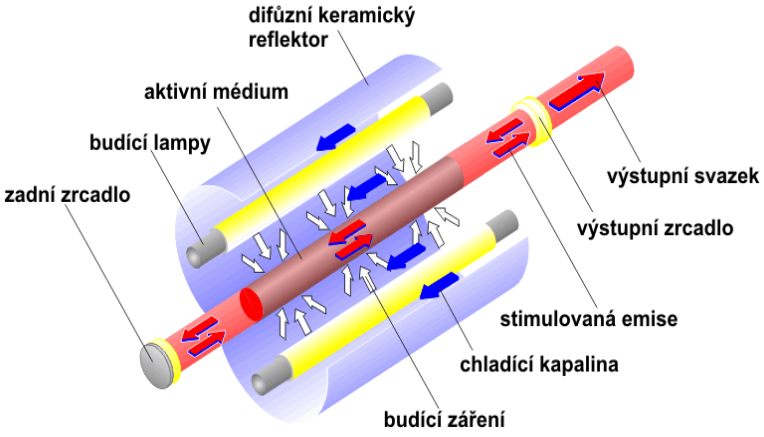
Obr. 8 Rozdělení laserů. [4]

2.3.1 Pevnolátkové

Jedná se o velmi rozšířené laserové zařízení. První laserový efekt byl dosažen v krystalu syntetického rubínu. Do pevnolátkových laserů můžeme prakticky zařadit všechny lasery, jejichž aktivní prostředí je tvořeno výbrusem daného pevného materiálu. Aktivní prostředí tvoří matrice ze skla nebo umělého krystalu (rubín, granát, yttrium-vanadát, křemíkové sklo) dopovaného vzácnými zeminami. Používá se ytterbium, erbium, neodym a další. Buzení je většinou optické, tedy výbojkami a diodami. Pevnolátkové lasery se používají pro svařování, řezání, spektroskopie a značení. Nejrozšířenějším pevnolátkovým laserem je Nd:YAG laser. Výhodami jsou stále stabilní aktivní prostředí a vedení částečně fokusovaného svazku optickým kabelem u vláknových pevnolátkových laserů. Paprsek se nemusí vést soustavou zrcadel k místu obrábění. Vedení paprsku optickým kabelem velice usnadňuje automatizaci procesu. Fokusace paprsku je provedena až v technologické hlavě. Aby nedošlo ke zkreslené představě, aktivní prostředí pevnolátkových laserů většinou tvoří sklo s přídavky vzácných prvků, nikoliv krystaly drahých kamenů (rubín). Takové lasery dosahují dostatečných výkonů pouze v pulzním režimu. Kontinuální zatížení by krystal zničilo. Výkon laserů se pohybuje v desítkách W. U průmyslových laserů se bavíme o výkonech v desítkách kW.

- Nd:YAG lasery

Aktivní prostředí tvoří yttrium aluminium granát (YAG) dopované neodymem (Nd) nebo ytterbiem (Yb). Aktivní prostředí má tvar tyčinky. Znázorněno na obrázku 9. Tyto lasery lze souhrnně označit jako lasery tyčové. Buzení se provádí jednak výbojkami (nízká účinnost a velká část energie se přemění na teplo, nutno chladit) nebo laserovými diodami (vyšší účinnost a lepší kvalitu svazku).

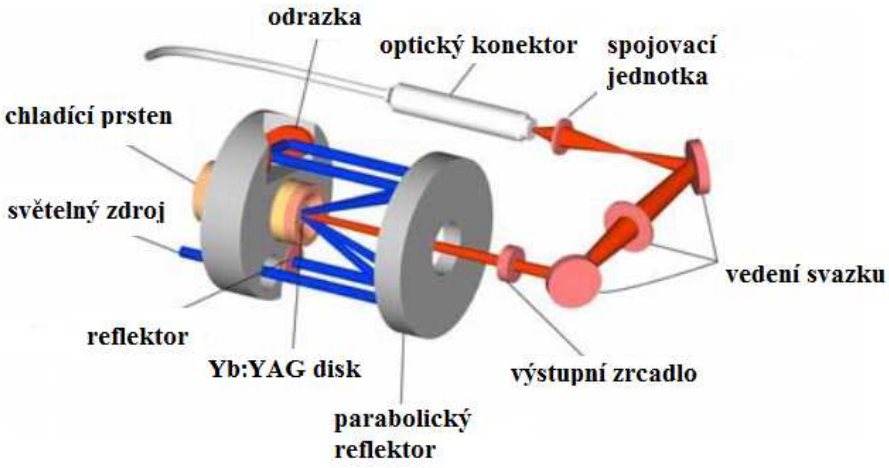


Obr. 9 Nd:YAG laseru. [32]

- Lasery LPSS (buzené výbojkami) – laserové svařování (hluboký průvar) a vrtání (vrtání ušlechtilých ocelí), výhoda je vysoká energie pulsu.
- Lasery DPSS (buzené diodami) – dva typy buzení dle uspořádání rezonátoru s bočním a zadním uspořádáním. Zadní buzení – budicí záření se vede do krystalu optickým kabelem (lepší kvalita svazku, nižší výkon). Boční buzení (vyšší výkon, nižší kvalita svazku). Používá se u značení a gravírování.

- Diskový

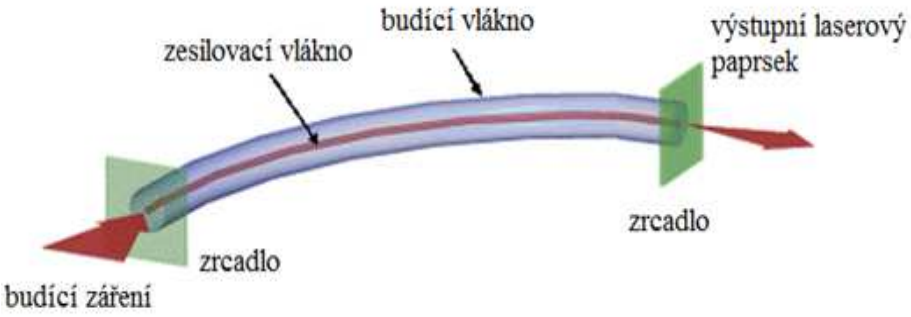
Princip podobný jako u Nd:YAG laseru. Aktivní prostředí má tvar malého disku. Výhodný teplotní profil po celém disku. Vysoké výkony až 16 kW. Oproti Nd:YAG laserům má lepší kvalitu výstupního svazku. Používá se pro výkonové operace jako svařování a řezání kovů. Účinnost diskových laserů je nízká, lze je ale dobře kombinovat s roboty a integrovat do výrobních linek. Umožňují poskytnout nepřetržitý vysoký výkon (letectví, těžký průmysl.) Buzení probíhá výkonovou laserovou diodou. Schematicky znázorněno na obrázku 10.



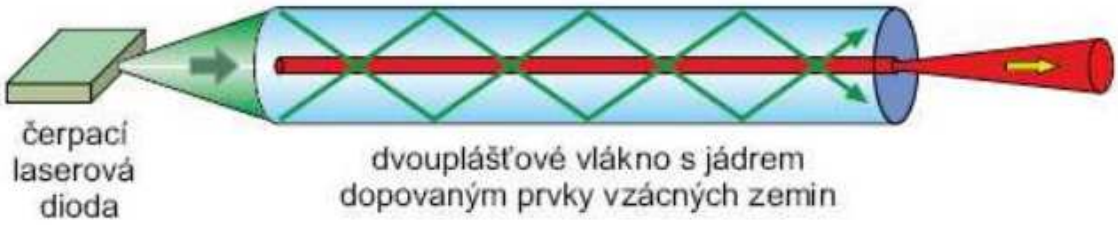
Obr. 10 Popis diskového laseru. [4]

- Vláknový

Vzorky pro experimentální část byly řezány na vláknovém ytterbiovém laseru YLS 2000 – SN, který představuje technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru. Oproti klasickým pevnolátkovým laserům je aktivní prostředí tvořeno optickým vláknem (světlovodný kabel) viz obrázek 11 a 12. Aktivní prostředí je dopované ytterbiem. V průmyslu je snaha nahradit Nd:YAG lasery právě pevnolátkovými vláknovými lasery.

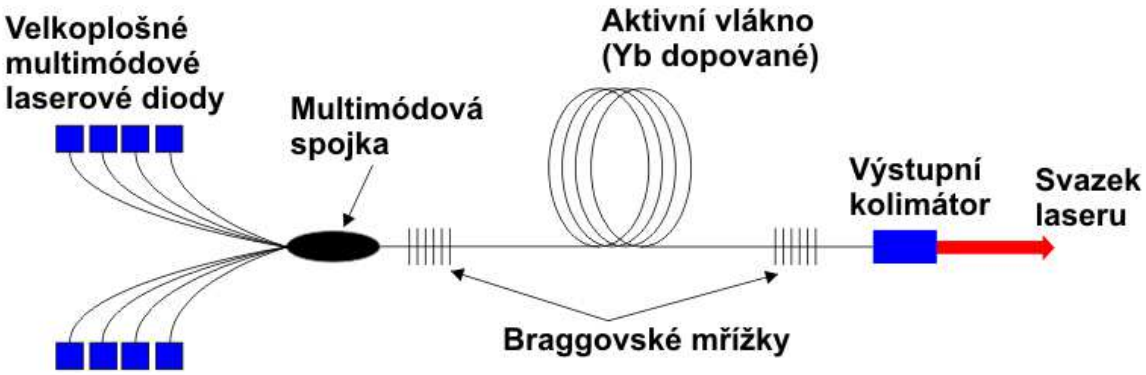


Obr. 11 Detail optického vlákna. [42]



Obr. 12 Princip čerpání aktivního vlákna přes plášť. [22]

Buzení laseru je optického charakteru (LED). Aplikace je vhodná pro tvarové řezání a svařování pomocí robotů, přesné vrtání, gravírování a řezání. Výkon laserů se pohybuje okolo 500 W na jedno vlákno. Kombinací více vláken dostaneme výkon pohybující se v kW (modularita). Lze provozovat bez vodního chlazení. Lasery umí kontinuální a pulzní provoz. Realizace laseru optickým vláknem přináší mimo jiné řadu výhod. Laser je tvořen v podstatě optickým kabelem (jednoduchost), má vysokou účinnost – až 48 %, vysokou životnost, malé prostorové nároky, nízké provozní náklady a nízké náklady na údržbu. Schematické seřazení laseru na obrázku 13.



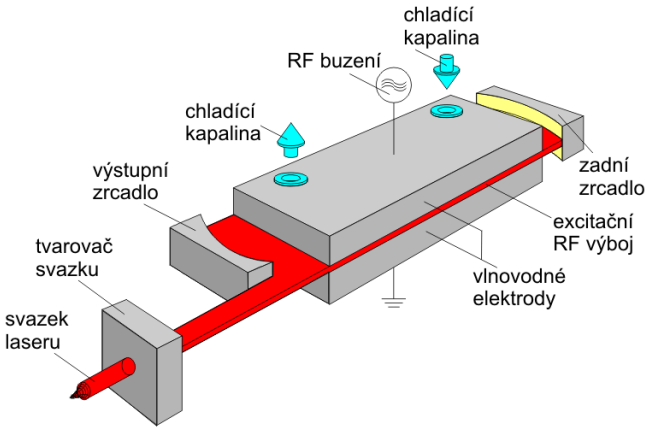
Obr. 13 Princip vláknového laseru. [32]

2.3.2 Plynové – CO_2 laser

Výkonový plynový CO_2 laser byl vynalezen roku 1964, což znamená, že je v průmyslu zavedený a stále používaný. Nejčastěji se používá k řezání a jeho hlavními výhodami jsou čistý a úzký řez a malá tepelně ovlivněná oblast. Naopak velkou nevýhodou je optická dráha. Pro vedení záření je nutno použít zrcadla.

- Laserové popisování – plasty, sklo, keramika, reklamní předměty, obaly v potravinářském průmyslu či logistice.
- Laserové řezání – plasty, dřevo, tkaniny a kůže a přírodní materiály.

Aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů $He+N_2+CO_2$ v uzavřené skleněné trubici. Proces zesílení začíná excitací molekuly dusíku. Při srážkách molekul dusíku s molekulami oxidu uhličitého dochází k rezonančnímu přenosu energií a excitaci. Aby nedošlo při vyzařování ke snížení inverze, je nutné zajistit návrat molekuly CO_2 do základního stavu. K tomu se používá helium, které odnímá oxidu uhličitému excitační energii a také ochlazuje aktivní prostředí. Výkon laserů se pohybuje od 0,5 do 20 kW. Lze dosáhnout i hodnoty až 200 kW. Účinnost CO_2 laserů je vyšší než u pevnolátkových, dosahuje hodnoty okolo 20 %. Výboj plynových laserů je orientovaný na úsporu provozních plynů. Schéma plynových laserů na obrázku 14. Podle směru proudění dělíme lasery na:



Obr. 14 Plynový laser. [32]

- S podélným prouděním – čerpané doutnavým výbojem.
- S příčným prouděním plynu – čerpané vysokofrekvenčním výbojem.

2.4 Porovnání průmyslových laserů [32], [42]

Pro rychlý a stručný přehled přikládám tabulku s nejpoužívanějšími průmyslovými lasery. Při pohledu na ni vidíme, jak vysoký výkon je schopný poskytovat. Dle toho lze i určit, na kterou aplikaci se laser hodí. Veliké rozdíly jsou i v potřebné ploše k uvedení do výroby, provozních nákladech a údržbě. Všechny hodnoty jsou přibližné a poskytují nám informativní přehled viz tabulka 1.

Tab. 1 Porovnání laserů. [32], [42]

	Nd:YAG	diskový Nd:YAG	vlákový Nd:YAG	CO_2 laser
Účinnost [%]	8	35	48	10
Výstupní výkon [kW]	až 6	až 16	až 100	až 20
Vlnová délka [nm]	1064	1070	1070	10600
Buzení	lampy, diody	diody	diody	rd*, el. výboj
Životnost diod [hod]	1000/10000	15000	100000	nepoužívá
Typ chlazení	voda	voda	vzduch/voda	voda
Pot. plocha [m^2] (při P = 4 kW)	6	4	1	7
Hod. provozní náklady [Kč]	1296	1188	729	810
Údržba	často	občas	není	často

*rd - radiofrekvenčně

2.5 Operace pomocí laseru ve strojírenství [14], [48], [2], [32], [51], [49], [28], [42]

Laser je v průmyslu rozšířený a používá se pro mnoho strojních aplikací jako řezání, popisování, značkování, povrchové úpravy, vrtání a další.

- Popisování laserem

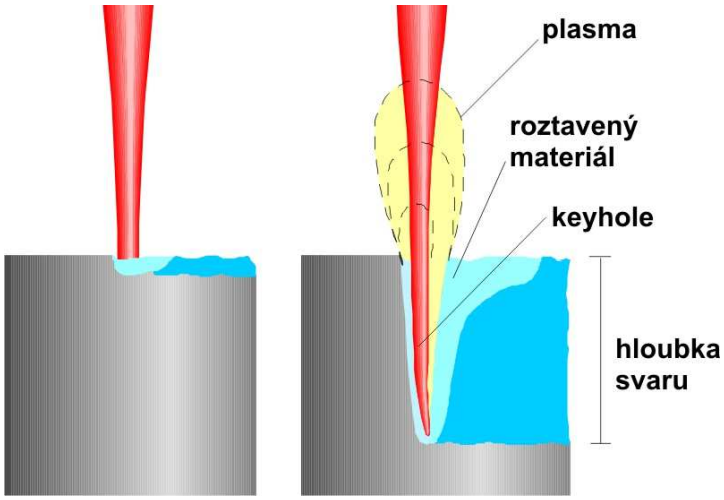
Mezi jednu z nejrozšířenějších aplikací laseru patří popisování, značkování, gravírování, texturování povrchů a další. Jedná se o nejuniverzálnější laserovou metodu. Používá se pro velkou část spotřebního a průmyslového zboží. Metodu lze aplikovat na téměř všechny materiály a umožňuje vytvoření nesmazatelného grafického či jiného motivu na povrchu obrobku. Popis vytváříme tepelným působením laserového svazku, který odstraňuje určitou tloušťku materiálu. Ilustrativní příklady použití na obrázku 15 a 16.

Obr. 15 Ilustrativní příklad použití. [43]

Obr. 16 Ilustrativní příklad použití. [49]

- Svařování

Laserová aplikace se používá i pro vytváření nerozebíratelných spojů v oblasti svařování. Metodu lze aplikovat pro hluboké svařování, navařování, spojování obrobku na povrchu, bodové a švové svařování, pájení a další. Svařitelnost materiálů je podobná jako u metody WIG. Aplikace umožňuje svářet materiály s vysokou tepelnou vodivostí (Cu, Al) i vysokou teplotou tavení (W, Mo). Příprava svarových ploch nevyžaduje zvláštní péči. Rovnoběžný paprsek z laseru se zaostří pomocí vhodné optiky do bodu, kde vlivem vysoké koncentrace energie je rychlost ohřevu o mnoho řádů vyšší než odvod tepla, vzniká tzv. key hole (spára). Díky vysoké hustotě energie jsou nečistoty před natavením odpařeny. Při svařování vzniká spára vyplněná párami kovu pod vysokým tlakem. Páry jsou vysokou teplotou ionizovány a tato laserem indukovaná plazma tryská z místa svaru.

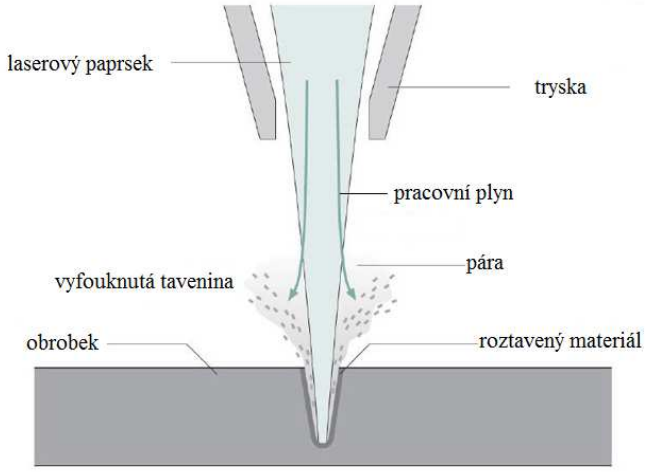


Obr. 17 Proces svařování laserem-kondukční a penetrační. [32]

Plazma brání pronikání fotonů a pohlcuje velkou část záření. Přivádíme ochranný plyn (Ar, He), který nám kryje tavnou lázeň a tuhnoucí svarový kov před kyslíkem. Ochranný plyn také odfukuje plazmu, aby se laserový paprsek dostal do hloubky a nebyl pohlcen plazmou. Poté se spárou šíří laserový paprsek. Máme dva režimy účinku laserového svazku na materiál – kondukční a penetrační viz obrázek 17. Výhody laserového svařování – adaptabilní s rychlou změnou technologie, provoz je tichý, není zapotřebí přídavný materiál, snadná automatizace procesu, svařování tenkých plechů v automobilovém průmyslu a další.

- Vrtání

Aplikace laseru se v této oblasti rozšířila díky svým přednostem, mezi něž patří bezkontaktní vrtání, minimálně tepelně ovlivněná oblast, vytváření malých otvorů 10–100 µm v místech, kde je to obtížné nebo kde další metody selhávají. Metoda je přesná a produktivní. Další nespornou výhodou je škála materiálů, do kterých lze vrtat, a to kovy, plasty, textilie, papír, sklo, dřevo a v neposlední řadě keramika a tvrdokovy, kde je laserové vrtání nenahraditelné. Energii do procesu vnáší krátký impuls laseru s vysokou hustotou výkonu, a to v krátké době. Tím docílíme odpaření materiálu viz obrázek 18. Roztavený materiál dostaneme z otvoru ven pomocí vysokého tlaku páry, který vznikne při zvětšení objemu materiálu ve vrtaném otvoru.



Obr. 18 Schéma laserového vrtání. [49]

- Ablační čištění

Metoda představuje vysoce efektivní a ekonomickou alternativu ke konvenčním technologiím čištění. Není nutná aplikace aditiv, chemikálií a jiných přídavných prostředků do procesu, ekologický provoz, nepoškozuje základní materiál, velmi nízké provozní náklady a další. Lasery jsou navržené jako průmyslová a téměř bezúdržbová zařízení. Principem je odpaření povrchové vrstvy díky absorpci fokusovaného laserového záření. Využíváme dvou fyzikálních efektů, a to odstranění povrchové vrstvy pomocí sublimace a odstranění vysokým tlakem, který je vyvolaný teplem. Vysoká teplota uvnitř materiálu vytvoří vysoký tlak. Ukázka, jak vypadá vyčištěný povrch, na obr. 19.

Obr. 19 Ablační čištění. [3]

3 TECHNOLOGIE DĚLENÍ MATERIÁLU [51]

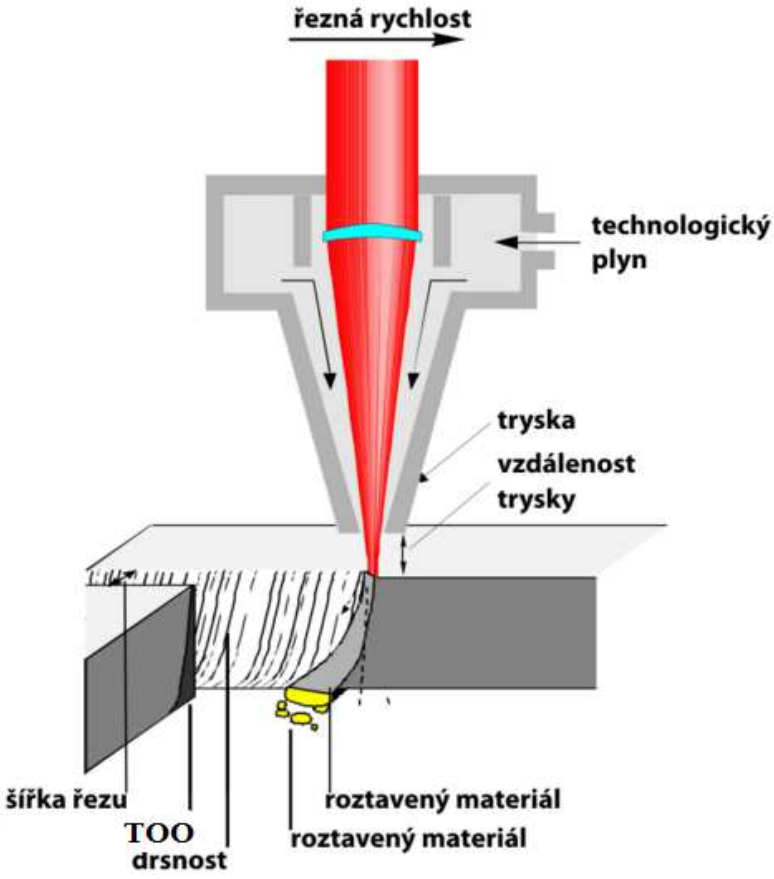
Důležitou součástí výrobního procesu je dělení materiálu, tedy všechny metody, které mechanicky, tepelně nebo na základě fyzikálně – chemických pochodů rozdělí polotovar na dva kusy. Ve strojírenství je známo a využíváno mnoho způsobů dělení jako plazmové řezání, řezání kyslíkem, řezání laserem a vodním paprskem. Velké zastoupení laserů v průmyslu právě slouží pro dělení materiálu. Mezi přednosti laserového dělení patří možnost dělit všechny technické materiály, ekonomika procesu, efektivnost a samozřejmě aplikace tam, kde laser nelze nahradit konvenční metodou.

3.1 Řezání laserem [28], [14], [41]

Počátky Laserového řezání sahají do 60. let 20. století, kdy byl uveden do provozu laserový systém pro řezání ocelových plechů. Masivnější rozšíření laserové technologie v průmyslu přišlo s CO_2 lasery. Postupně se objevovaly pevnolátkové lasery. Nyní se díky svým vlastnostem tlačí do popředí vláknové lasery. Metoda dělení materiálu je charakteristická vysokou koncentrací energie.

- Princip

Energii nutnou pro dělení materiálu získáme fokusací (zaostřením) laserového paprsku. Jeho energie je přeměněna na energii tepelnou při interakci s materiálem. Postup je ve většině případů podpořen technologickým plynem. Pomocný plyn vyfukuje taveninu, páry, oxidy a další vznikající produkty ven z místa řezu viz obrázek 20. Metoda je bezkontaktní. V okolí řezné spáry je díky minimálnímu množství vneseného tepla malá tepelně ovlivněná oblast. Přesnost dosahuje hodnot od 0,05 po 0,1 mm a drsnost Ra 1,6 µm. Hodnoty jsou však orientační, záleží na materiálu, dané tloušťce a použitém laseru. Snahou je soustředit velkou hustotu energie na co nejmenší dopadovou plochu. Při řezání laserem hodnotíme vhodnost materiálu k tomuto procesu pomocí vlastností optických a termo-fyzikálních. Za hlavní vlastnost materiálu považujeme absorpci povrchu vstřebat světelné záření, dopadající



Obr. 20 Schéma laserového řezání. [32]

na povrch a měnit ho právě na tepelnou energii. Světelná energie (záření) přímo působí na krystalickou mřížku a zvyšuje frekvenci kmitání, tím se zvyšuje teplota materiálu. Dochází nám i ke ztrátě energie v podobě odrazu a rozptylu do prostoru. Největší vliv na schopnost absorpce materiálu má vlnová délka světelného paprsku. Záření o kratší vlnové délce dosahuje lepší absorpce. S teplotou materiálu roste schopnost absorpce materiálu. Materiál vhodný pro řezání laserem je schopný dobré absorpce světelného záření. Hloubka průniku závisí na výkonu laserového zdroje. Mezi hlavní výhody patří:

- Vysoká řezná rychlost v desítkách metrů za minutu.
- Kolmý řez, vysoká přesnost.
- Potlačení nevýhod konvenčních technologií.
- Řezání téměř všech známých materiálů.
- Snadná automatizace.

3.2 Režimy laserového řezání [28], [41], [32]

- Tavný režim

Kontinuálním laserovým paprskem se materiál ohřívá na teplotu tavení a proudem inertního plynu (N_2) se vyfukuje tavenina z řezné spáry. Díky vysokému povrchovému napětí musí být tlak pracovního plynu v rozmezí 10–15 bar. Vysoký tlak plynu také zabrání ulpívaní taveniny na spodní hraně řezu. Řezný proces je poměrně pomalý, protože v řezu nevzniká dodatečné teplo. S výkonem laseru lineárně roste řezná rychlost a klesá s tloušťkou materiálu. Používá se pro vysokolegovanou ocel, měď, hliník, nekovové materiály, keramiku a další. Je vhodné pro dělení nerezových ocelí. Vyznačuje se kvalitním řezem a vysokým výkonem, vysokou spotřebou řezného plynu. Liší se i umístěním ohniska, jež je umístěno níže než u oxidačního režimu.

- Oxidační režim

Oxidační režim se od tavného liší použitím pracovního plynu, což je kyslík s tlakem okolo 3–5 bar. Základ řezání tvoří exotermická reakce kyslíku s materiálem, která probíhá při příslušné zápalné teplotě kovu. Teplo vzniklé exotermickou reakcí se používá k předehřevu místa řezu a ohřevu taveniny a oxidů. Řezná rychlost i tloušťka je vyšší než u tavného režimu. Využití pro nelegovanou až středně legovanou ocel, u ostatních kovů způsobuje kyslík oxidaci řezných hran a okuje. Metoda vhodná na dělení konstrukčních uhlíkatých ocelí.

- Sublimační režim

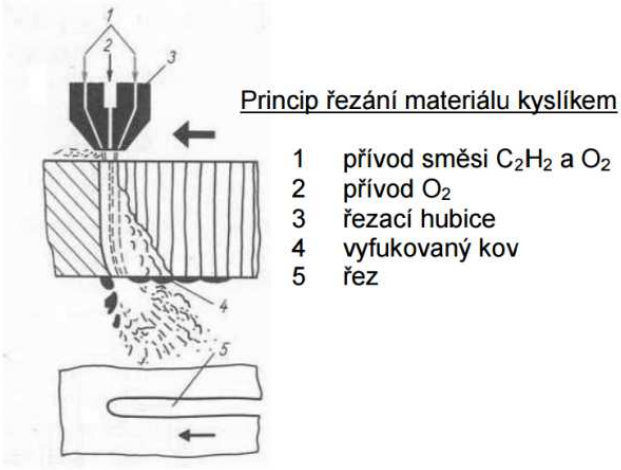
Pulzní laserový paprsek ohřívá materiál na teplotu varu, při které se silně odpařuje. Pulzní režim se využívá, protože v časové prodlevě mezi pulsy unikají páry materiálu mimo kapiláru. Pro jejich odstranění je možno použít slabý proud inertního plynu. Využívá se u vrtání a řezání tenkých plechů. Jelikož téměř nedochází k tavení materiálu, je řez kvalitní, hladký a bez otřepů. Nutná je vysoká koncentrace paprsku.

3.3 Další metody – plazma, kyslík, vodní paprsek [29], [28], [19], [37], [38]

Konvenční metody dělení materiálu mechanického rázu nebudeme rozebírat (řezání, stříhání a podobně). Mezi nekonvenční metody patří elektroerozívní řezání, řezání laserem, elektronovým paprskem, plazmou a řezání kyslíkem.

- Řezání kyslíkem

Základ řezání kyslíkem spočívá ve spalování železa v kyslíku. Materiál se předehřeje plamenem (směs plynů C_2H_2+O_2) na cirka 1100 °C, následně se otevře vedení kyslíku a dochází ke spalování řezaného kovu. Tlakem plynu se vyfukuje roztavený kov, zplodiny a další. Kyslík spaluje materiál v úzkém pruhu a vytvoří řeznou mezeru. Princip metody je zachycen na obrázku 21. Metoda se v podstatě používá jen pro dělení ocelí s nízkým obsahem uhlíku (do 0,7 % C) a při tloušťce do 300 mm. Kvalita řezu je horší než u plazmového řezání. Existují určité podmínky, aby materiál byl vhodný pro tuto metodu:



Obr. 21 Princip řezání kyslíkem. [19]

- Zápalná teplota materiálu musí být nižší než teplota tavení (zápalná teplota oceli cca 1100 °C a teplota tavení cca 1500 °C).
- Teplota tavení oxidů musí být nižší než teplota tavení základního materiálu.
- Při řezání musí vznikat dostatek tepla na předehřátí materiálu.

- Řezání plazmou

Pří řezání plazmou se využívá plazmový paprsek. Kov se natavuje teplem plazmového oblouku. Kinetickou energií plazmových plynů je natavený kov odstraňován z místa řezu. Princip plazmového řezání je v podstatě shodný s plazmovým svařováním. Lze řezat všechny vodivé materiály. Běžně se řežou materiály do tloušťky 25 mm, lze až do 250 mm. Rychlost u tenčích plechů se pohybuje okolo 10–12 $m.min^{-1}$. Plazmový paprsek jako tepelný zdroj je koncentrovaný elektrický oblouk, v němž plazma vzniká ionizací plazmového plynu.

- Řezání vodním paprskem

K dělení materiálu dochází obrušováním základního materiálu tlakem vodního paprsku. Paprsku se pro dosažení koncentrované energie nutné pro řez dosahuje zrychlením kapaliny v trysce díky vysokému tlaku. Pracovní tlak se pohybuje od 2000 do 6200 barů. Jako pohon se využívají vysokotlaká čerpadla. Paprsek vzniká přívodem do trysky, která má světlost cca 1 mm. Dělit můžeme materiály s vysokou pevností, měkké, křehké a houževnaté materiály.

- Čistý vodní paprsek

Jako řezné médium se používá voda, která může být filtrována od usazenin v ní obsažených. Řez je čistý a přesný. Základem je transformace vysokého tlaku na vysokorychlostní děj pomocí trysky. Metoda se používá převážně pro nekovové materiály (plasty, izolace, papír, pryž a další).

- Abrazivní vodní parsek

Jedná se o tutéž metodu s jedním rozdílem, a to - přívod abraziva do proudu kapaliny. Tato metoda eliminuje tření mezi nástrojem a obrobkem. Nedochází k tepelnému ovlivnění materiálů, takže podstatou je obrušování děleného materiálu. Úběr materiálu je realizován úzkým abrazivním paprskem o vysoké rychlosti a kinetické energii. Vhodné pro sklo, titan, mosaz, hliník, kámen, ocel a další.

3.4 Řezné parametry a vady řezu [51], [14], [41], [1], [50], [15], [12], [13]

Parametry, to jsou činitele, které nám určují výsledek daného procesu, proto s nimi pracujeme. Parametrů laserového zařízení je mnoho, např. parametry paprsku, fokusační optiky a další. To jsou parametry, které nemůžeme na daném laseru měnit. Pro technologický proces jsou zavedeny řezné parametry:

- Režim řezu (kontinuální/pulzní).
- Výkon laseru

Existuje hlavní parametr, kterým se definuje laser. Často se hodnota výkonu objeví v jeho pojmenování. Většinou se uvádí v kW. Množství vneseného tepla do procesu ovlivňuje výkon a řez. Příliš velké vnesené teplo zapříčiní hrubnutí řezu (obrázek 22). Při nízkém vneseném teplu dojde k nedořízntutí spodní hrany. Musíme dbát na čistotu zrcadel, znečištěná zrcadla snižují celkový výkon.

Obr. 22 Vliv výkonu na povrch řezu – malý výkon - optimální - velký. [41]

- Řezná rychlost

Je jedním z hlavních řezných parametrů. Jednotka se běžně udává v metrech za minutu. Naším cílem je nalézt optimální řeznou rychlost. Příliš nízká řezná rychlost ke zvolené intenzitě způsobí spálení řezu a vznik spálených míst na řezné ploše (obrázek 23). Příliš vysoká řezná rychlost zapříčiní otřepy nebo se materiál vůbec neprořízne. Obecně lze říci, že s rostoucí tloušťkou materiálu klesá řezná rychlost a zvyšuje se výkon paprsku. Řeznou rychlost lze orientačně určit dle energetické bilance.

Obr. 23 Vliv řezné rychlosti – malá rychlost - optimální - velká. [41]

- Tlak a typ řezného plynu

Tlak plynu volíme v závislosti na tloušťce materiálu a na metodě dělení. Při oxidačním režimu se volí větší tlaky pro materiály s menší tloušťkou a naopak. Při tavném režimu je tomu právě naopak. Tlak je udáván v barech nebo MPa. Velmi důležitá je i čistota plynu. Jeho kvalita má zásadní vliv na kvalitu řezu. Čistota N_2 je (99,999%) a kyslíku (99,95%). Pokud dojde k znečištění kyslíkem u N_2, bude hrana řezu oxidovat a dojde ke tvorbě otřepů.

V procesu je důležitý nejen tlak, ale i geometrie trysky, které volíme dle konkrétního druhu řezání. Obecně lze říci, že pro materiály s větší tloušťkou volíme větší průměr trysky. Projevy tlaku plynu na materiál vidíme na obrázku 24. Na kvalitu řezu a drsnost povrchu řezné plochy má vliv tlak plynu a geometrie trysky. Proto máme zavedeny i parametry řezného plynu – druh plynu, pracovní tlak, průměr trysky, kterou proudí řezný plyn, a geometrie tvaru trysky. Tlak plynu se pohybuje v rozmezí od 100 kPa až 2 MPa. Trysky mají kruhovitý, kuželovitě rozšiřující otvor. Odstup trysky od materiálu je mezi 0,5–2,5 mm. Průmět trysek se pohybuje mezi 1–2,5 mm.

Obr. 24 Vliv tlaku plynu - malý tlak - optimální – velký. [1]

- Mezi další parametry můžeme zařadit – polohu ohniska, odstup trysky od plechu, parametry ovlivňující ostrý roh, parametry vpichu.

Pro proces řezání jsou samozřejmě důležité i tepelně – fyzikální vlastnosti řezaného materiálu. Dle nich se volí řezné parametry. Vlastnosti 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.

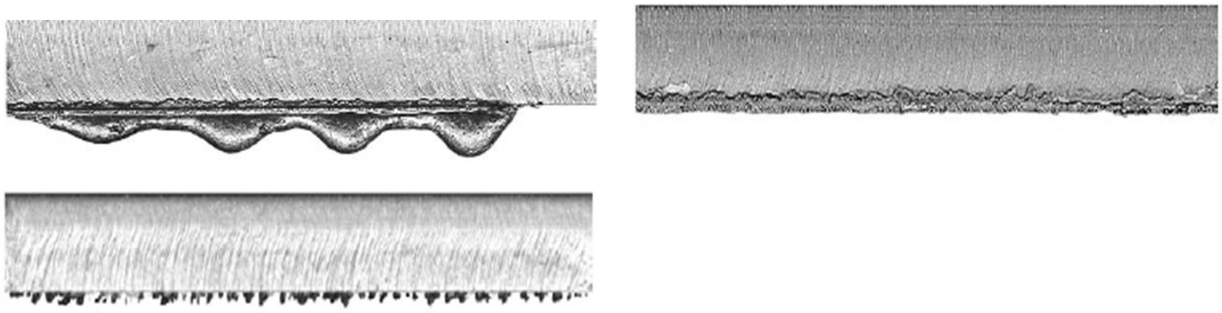
Vady řezu

Problematikou vad při řezání laserem se zabývá norma ČSN EN 12584: Vady při řezání kyslíkem, laserem a plazmou – Terminologie. Zmíníme základní vady řezu, které lze hodnotit i vizuálně. Vady řezu vznikají nevhodným nastavením procesních parametrů a nevhodnými podmínkami procesu, jako jsou:

- Nevhodné nastavení řezných parametrů.
- Špatně nastavená optická soustava a její degradace během procesu (vycentrování trysky, špatné umístění ohniska, zašpinění, zahřívání čočky).
- Degradace laserového rezonátoru (nedostatečné chlazení, kroucení zrcadel a vychylování z původní polohy).

Druhy vad

- Otřep – jedno z nejdůležitějších kritérií pro hodnocení kvality řezu. Najdeme ho na spodní hraně řezu a vzniká při výstupu paprsku z obrobku. Hodnotíme jeho velikost a typ. Vliv na otřepy má fokusace laserového paprsku. Otřepy dělíme do dvou skupin. Silně adhesivní otřepy je nutné odstranit dalším obráběním a málo adhesivní otřepy jsou snadno odstranitelné bez dalšího obrábění.
  - Slzovitý otřep – silně adhezivní, nejhůře odstranitelný, ztuhlé kapky kovu na spodní hraně řezu (obrázek 25).
  - Struskovitý otřep – křehký, snadno odstranitelný (oxidační řezání), znečištěný plyn (obrázek 25).
  - Ostrý otřep – přichycen na spodní hraně, snadno odstranitelný (tavné řezání) (obrázek 25).



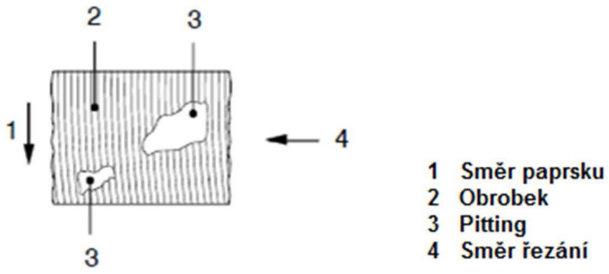
Obr. 25 Otřepy – slzovitý, struskovitý, ostrý. [49], [50]

- Nesouměrná řezná spára

Řezná spára je v podstatě šířka řezu. Do hloubky řezu se šířka spáry zužuje – podřezávání. Objevuje se u obrobků větší tloušťky. Je závislá na poloze ohniska, materiálu, vlnové délce a postupu řezání. Šířka řezné spáry ovlivňuje proces řezání. Do širší řezné spáry lépe vniká plyn, dochází k jeho lepšímu proudění. Naopak v úzké spáře vznikají turbulence a špatné proudění plynu.

- Výmoly (pitting)

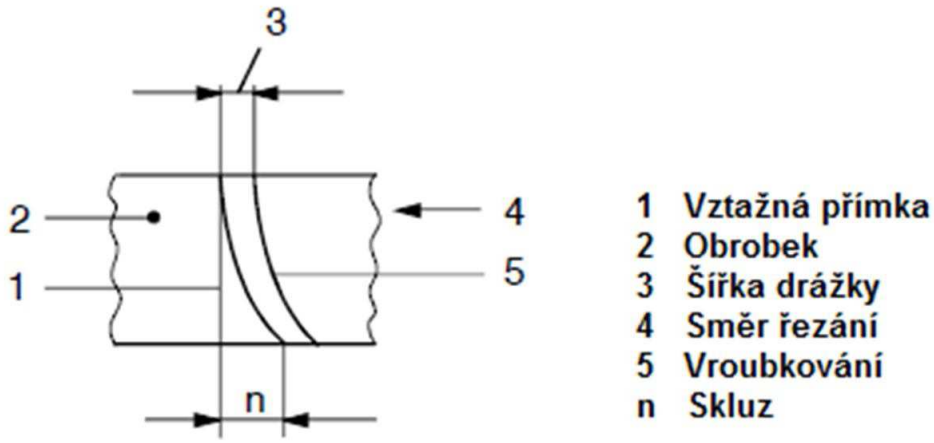
Eroze materiálu, jedná se o vypálená místa nebo krátery. Narušují sourodost řezné plochy. Vzniká při změně směru řezání, vadách materiálu, jako jsou vady ve struktuře (vměstky a nečistoty). Znázornění výmolu na obrázku 26.



Obr. 26 Výmol. [49], [50]

- Skluz

Okraje obrobku mají rýhovanou strukturu. Při nízkých řezných rychlostech jsou drážky skoro souběžné s laserovým paprskem. Při zvýšení řezné rychlosti dochází k většímu skluzu. Skluz nám určuje drsnost řezné plochy (obrázek 27).



Obr. 27 Skluz. [50]

4 VLASTNÍ EXPERIMENT

Studium procesních parametrů provádíme, protože nás zajímá cena výrobku, výrobní čas a kvalita řezu. Pro nejlepší výsledky zmíněných kritérií musíme vědět, jak řezné parametry ovlivňují proces. Dle operačních manuálů dodávaných výrobci laseru jsou známy doporučené hodnoty procesních parametrů, ty ale ne vždy odpovídají skutečnosti. Lze vycházet i ze zkušenosti obsluhy laseru a udělat takzvaný nástřel hodnot. Přes všechny tyto informace potřebujeme buď minimálně ověřit tvrzení, anebo najít ideální hodnoty procesních parametrů, a to ať už z hlediska lepší kvality řezu, nižší ceny nebo vyšší produktivity, která úzce souvisí s výrobním časem a cenou výrobku.

Úkolem této práce je vyhodnotit závislost procesních parametrů na drsnost povrchu řezné plochy. Obsluha laseru nařezala 3 sady vzorků. Sada 1 má tloušťku materiálu 1 mm, sada dva 2 mm a třetí sada 3 mm. Sady obsahují 15 až 17 vzorků. První vzorek v každé sadě byl nařezán s výchozími parametry dle odhadu obsluhy laseru. Poté byly vzorky řezány s jedním proměnným parametrem. U vzorků jsme snižovali a zvyšovali výkon laseru při zachování výchozího tlaku a řezné rychlosti. Následně byl snižován a zvyšován tlak pracovního plynu při zachování výchozího výkonu a řezné rychlosti. Naposled byla snižována a zvyšována řezná rychlost při zachování výchozího výkonu a tlaku pracovního plynu. Poté se za pomoci kontaktního měřidla drsnosti MarSurf M300 změřila drsnost každého vzorku. Naměřená data se zpracovala, vyhodnotila, graficky zpracovala a vyvodily se závěry.

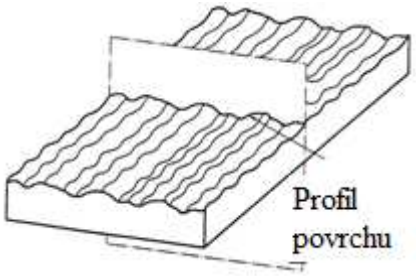
Vzorky byly řezány na pevnolátkovém vláknovém laseru YLS 2000 – SN. Maximální výkon laseru dosahuje 2000 W. Aktivní prostředí je tvořeno optickým vláknem dopované Yb. Aktivní prostředí je buzeno diodami. Použitá řezná hlava má označení YRC 100 od výrobce Precitec. Řezná hlava je upevněna na robotu IRB 2400 od výrobce Abb.

4.1 Měření drsnosti a norma ČSN EN ISO 4287 [10], [50], [44], [14], [15], [11], [20]

Nejdříve zavedeme pojmy týkající se struktury povrchu norma ČSN EN ISO 4287. Posléze zhodnotíme vzorky dle normy ČSN EN ISO 9013, která se zabývá laserovým dělením. Jakost povrchu funkční plochy, v našem případě řezné plochy, posuzujeme z různých hledisek:

- Přesnost rozměrů, geometrický tvar, polohy, struktura povrchu.

Vzorky budeme vyhodnocovat z hlediska struktury povrchu. Nerovnosti povrchu představují prostorový útvar, což je velmi obtížné na posuzování. Tuto situaci řešíme redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. Průmět povrchu do kolmé roviny vytvoří profil povrchu (obrázek 28). Při měření drsnosti získáme jen přibližný profil povrchu, který se skutečnému povrchu přibližuje. Snímací prvek není tak ostrý, aby zachytil skutečný profil povrchu. Nejpoužívanější snímací prvek je snímací hrot. Pro vyhodnocení struktury povrchu se snímací hrot pohybuje po snímané délce lt, na níž dochází k vyhodnocení struktury povrchu. Vyhodnocovaná délka se skládá z menších úseků, které nazýváme základní délky.



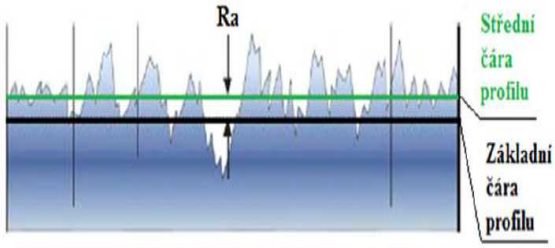
Obr. 28 Profil povrchu. [10]

Norma ČSN EN ISO 4287 zavádí následující definice parametrů profilu:

- Největší výška profilu *Rz*, – jako součet výšky *Zp* nejvyššího výstupku profilu a hloubky *Zv* nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. Obrázek 29.
- Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra – jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic Z (x) v rozsahu základní délky. Obrázek 30.

Nerovnosti, respektive drsnost funkční plochy, mají zásadní vliv na funkčnost součástí, přesnost, životnost, spolehlivost, únavovou pevnost a odolnost proti korozi.

Obr. 29 Zobrazení Rz. [10]

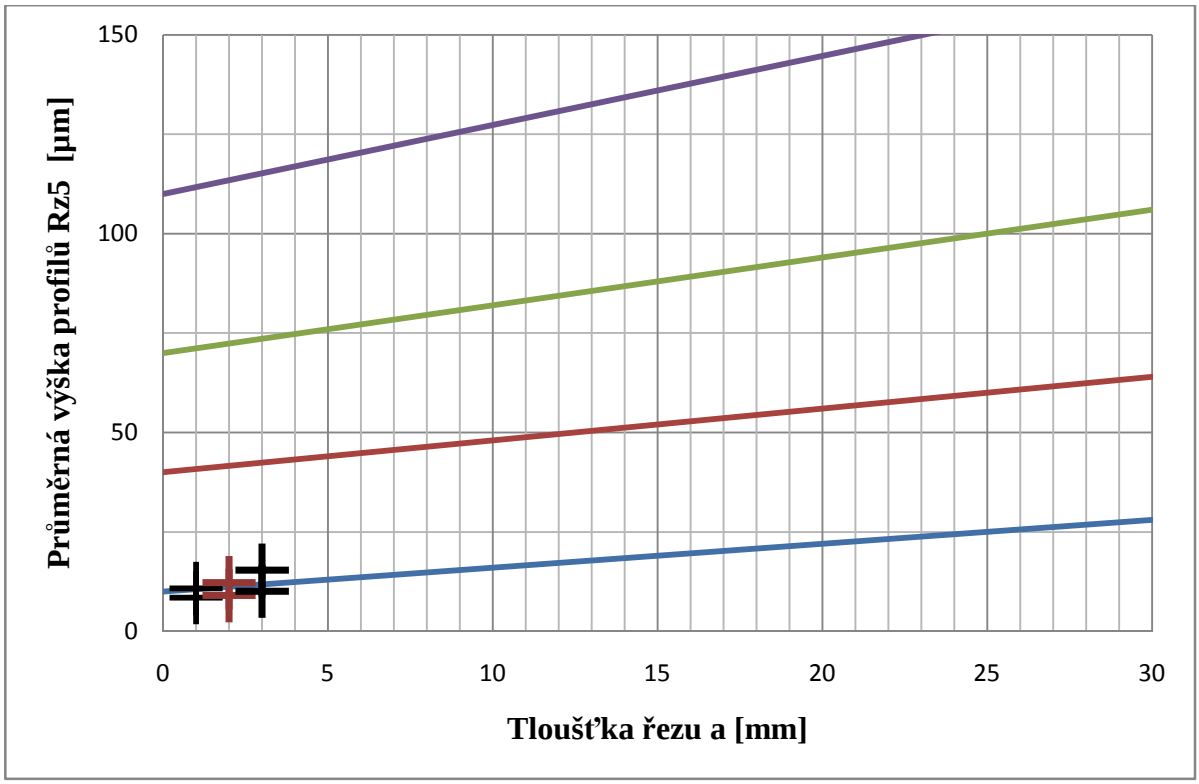


Obr. 30 Zobrazení Ra. [14]

4.2 Norma ČSN EN ISO 9013 [12], [14]

Jedná se o normu, která se zabývá problematikou tepelného dělení materiálů. Zahrnuje metody řezání kyslíkovým plamenem, plazmové řezání a řezání laserem. Norma je vymezená pro dané tloušťky materiálu. Plamen platí pro tloušťky od 3 mm do 300 mm, plazma od 1 mm do 150 mm a řezy laserem od 0,5 mm do 40 mm. Norma se zabývá geometrickými požadavky a úchylkami jakosti povrchu. Určuje pravidla pro popsání jakosti řezů nezávisle na metodě. Podmínky a metodika měření vychází z této normy. Měření se provádí na očištěných řezech mimo oblasti vady. Místa měření umisťujeme tam, kde předpokládáme nejvyšší drsnost povrchu, tedy nejhorší kvalitu řezu. Norma stanovuje počet měření a v jaké vzdálenosti. Pro naše tloušťky materiálu musí být dohodnuta pravidla a postup měření. Pro měření se používá dotykový hrotový přístroj. Měření se provádí v horní třetině hrany od horní třetiny řezu. Tato norma hodnotí povrch průměrnou výškou prvků profilu Rz5. Jedná se o aritmetický průměr jednotlivých výšek prvků profilu pěti po sobě jdoucích základních délek. Pro úchylky kolmosti a hodnotu Rz5 jsou v norně uvedeny tabulky s tolerančními poli pro příslušný parametr. Pro náš případ právě naměřené Rz odpovídá Rz5, použitý profilometr vnímá měřený úsek jako 5 sousedících úseků. Rozmezí hodnot Rz5 v tabulce 2. Naměřené hodnoty Rz jsme zanesli do příslušného grafu vycházejícího z normy pro znázornění výsledků (obrázek 32). V grafu jsou zaneseny jen nejlepší a nejhorší drsnosti pro každou tloušťku materiálu, zbylé hodnoty se pohybují v rozmezí těchto bodů. Pro lepší znázornění výsledků poslouží obrázek 31. Kvalita povrchu řezu se definuje příslušnými veličinami:

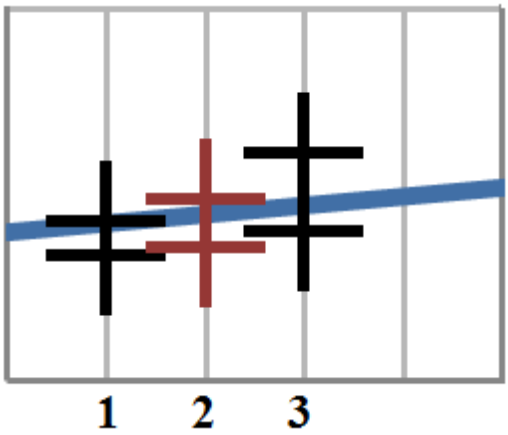
- Úchylka kolmosti.
- Průměrná výška prvků profilu Rz5.
- Skluz, natavení horní hrany.
- Možný výskyt okují a otřepů.



Obr. 32 Graf vycházející z normy ČSN EN ISO 9013. [12]

Tab. 2 Toleranční pole Rz5. [12]

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu Rz5 [µm]
1	10 + (0,6. a mm)
2	40 + (0,6. a mm)
3	70 + (0,6. a mm)
4	110 + (0,6. a mm)



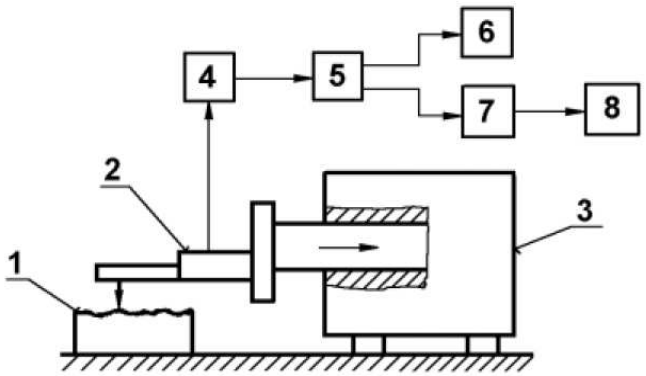
Obr. 31 Zvětšení části grafu Rz5. [12]

4.3 Kontaktní měření drsnosti

Metod k posouzení drsnosti povrchu je mnoho. Máme metody kvalitativní a kvantitativní, dvourozměrné nebo třírozměrné. Přístroje pro získání údajů v kvantitativní metodě rozdělujeme na:

- Dotykové.
- Bezdotykové.
- Ostatní.

U přístrojů využívajících dotyk s povrchem se posouvá měřicí hrot po povrchu a kopíruje ho. Z toho se vypočítávají potřebné parametry. Přístroj pro dotykovou metodu se nazývá profilometr. Skládá se z mechanické části (měřicí rameno a na něm snímací hrot) a elektronické. Schéma dotykového měření profilometrem na obrázku 33.



1 – měřená součást
2 – snímací hlavice s měřícím hrotem
3 – posuvový mechanismus
4 – zesilovač
5 – filtr
6 – registrační jednotka
7 – jednotka zpracovávající měřící signál
8 – zobrazovací jednotka

Obr. 33 Schéma dotykového měřicího přístroje. [44]

4.4 Vlastní měření

Úkolem vlastního měření bylo změřit drsnost povrchu vzorků nařezaných Yb-YAG laserem, jenž se nachází na Ústavu přístrojové techniky v Brně, kde jsem pod vedením pana docenta provedl měření drsnosti. Měření jsme prováděli na přenosném profilometru Mahr Marsurf M300 s posuvnou jednotkou MarSurf RD 18 se snímačem PHT 6 – 350 (obrázek 34).

Obr. 34 Profilometr Mahr Marsurf M300.

Vybalili jsme profilometr a za pomoci bezdrátové sítě jsme ho propojili s posuvnou jednotkou. Vše jsme položili na rovný stůl a podložili posuvnou jednotku do potřebné výšky. Zařízení bylo nastaveno na vyhodnocování parametrů Ra a Rz. Měřená dráha lt měřila 1,75 mm. Zařízení jsme kalibrovali podle etalonu. Měření bylo provedeno za běžných podmínek, teplota 20 °C a tlak 101 kPa. Vzorky byly upnuty do strojního svěráku, viz fotografie 35. Posuvné snímací zařízení jsme ustavili vůči vzorku tak, aby snímací hrot byl v jedné třetině od horní hrany řezu. Ve vertikální poloze byl odpružený hrot nastaven do poloviny svého kmitu. Provedli jsme měření a hodnoty jsme si poznamenali. Každý vzorek jsme měřili ze třech stran a pro sestavení grafů jsme z nich udělali aritmetický průměr. Postup jsme zachovali pro všechny vzorky stejný. Získaná data jsme následně zpracovávali dále.

Obr. 35 Vlastní měření drsností.

4.5 Zpracování a vizualizace dat

Naměřená data byla graficky zpracována. Pro stanovení minima křivek jsme vytvořili příslušné soubory hodnot a proložili je křivkou. V grafech jsou znázorněny chybové úsečky s vypočítanou směrodatnou odchylkou. Proložená křivka předpokládá průběh dané funkce s lokálním minimem, jedná se o polynom čtvrtého a šestého řádu. Jako vstupní hodnoty pro tvorbu grafu jsme vzali aritmetický průměr tří hodnot naměřených pro každý vzorek. Nejlepší drsnosti jsou v tabulkách zvýrazněny tučně. Řezná rychlost je udávaná v $mm.s^{-1}$, což je pro laser běžné. Převod na známější jednotku $m.min^{-1}$ je následující: 1 $mm.s^{-1}$=0,06 $m.min^{-1}$. Z technologického hlediska, respektive z pohledu optimalizace, nás zajímá především parametr řezná rychlost. V praxi se nejčastěji pracuje právě s ní. Například optimalizace řezné dráhy místo ostrých rohů rádiusy a podobně.

V tabulkách 3, 4 a 5 je souhrnný přehled dosažených drsností. Tabulka 3 znázorňuje změnu výkonu, tabulka 4 změnu tlaku plynu a tabulka 5 pro změnu řezné rychlosti. Tabulky vždy zahrnují všechny tloušťky materiálu. Hodnoty v tabulkách jsou vstupní pro tvorbu grafů. V grafech 36 až 41 nalezneme vykreslené předpokládané průběhy funkcí. Grafy jsou realizovány pro hodnoty Rz a Ra, v každém grafu jsou zaneseny všechny tři tloušťky.

Tab. 3 Tabulka hodnot pro změnu výkonu.

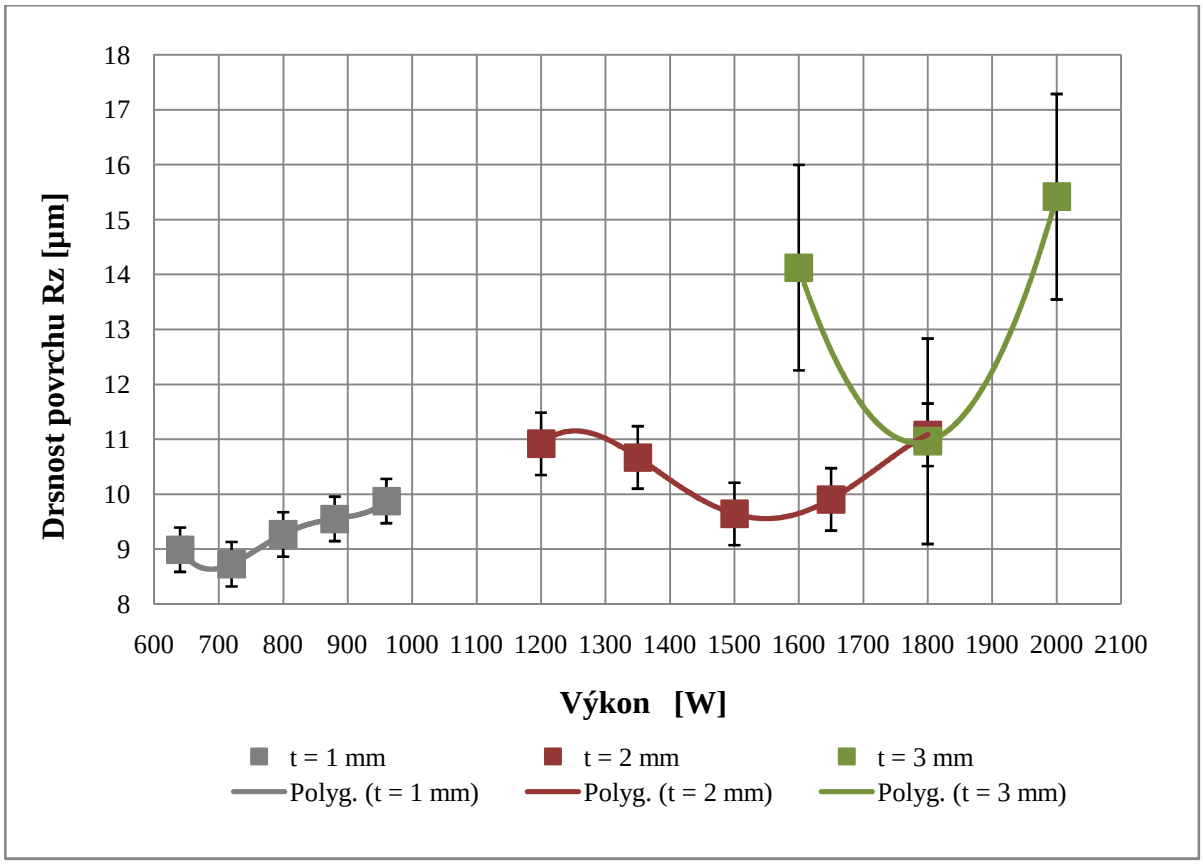
t = 1 [mm]	100 %	110 %	120 %	**90 %**	80 %
Výkon [W]	800	880	960	**720**	640
Rz [µm]	9,267	9,551	9,876	**8,727**	8,99
Ra [µm]	2,13	1,993	2,031	**1,862**	2,176
t = 2 [mm]	**100 %**	110 %	120 %	90 %	80 %
výkon [W]	**1500**	1650	1800	1350	1200
Rz [µm]	**9,64**	9,906	11,083	10,67	10,917
Ra [µm]	**2,069**	2,211	2,577	2,509	2,488
t = 3 [mm]	100 %	**90 %**	80 %		
výkon [W]	2000	**1800**	1600		
Rz [µm]	15,417	**10,964**	14,127		
Ra [µm]	3,285	**2,445**	2,899		

Tab. 4 Tabulka hodnot pro změnu tlaku plynu.

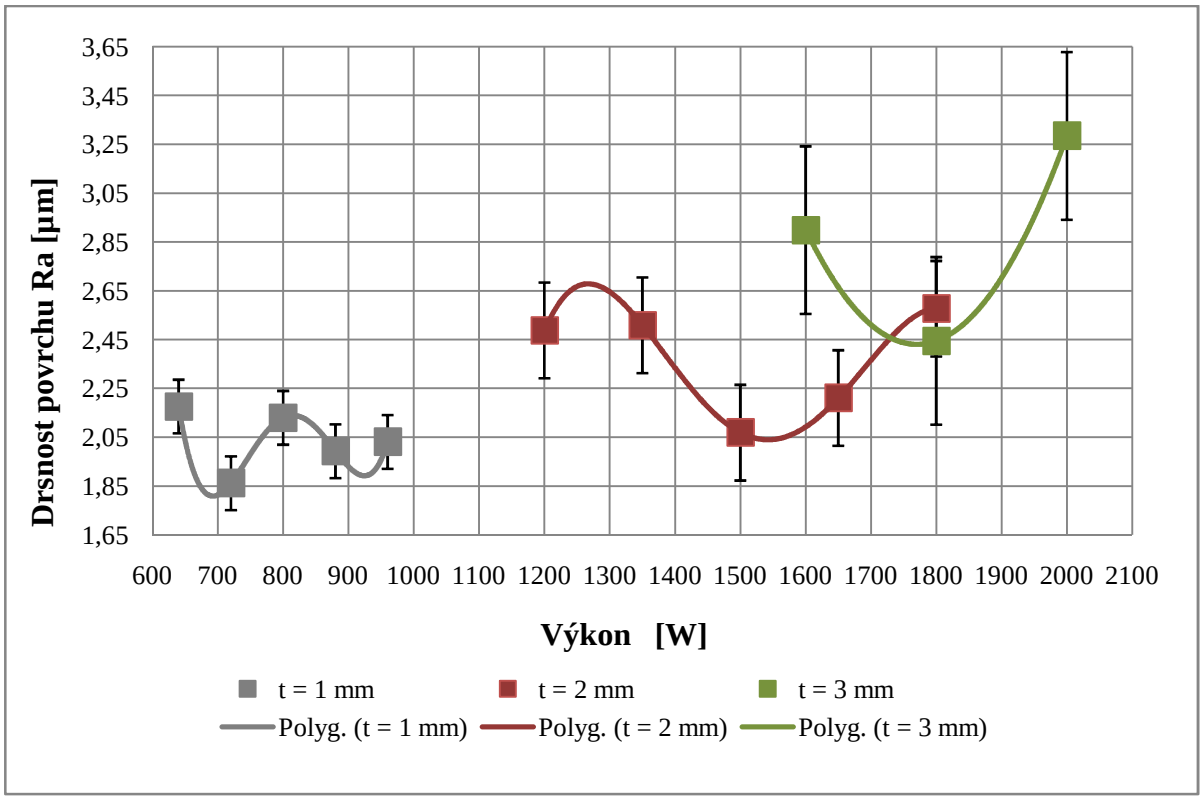
t= 1 [mm]	100 %	110 %	120 %	**130 %**	90 %	80 %	70 %
tlak plynu [bar]	5	5,5	6	**6,5**	4,5	4	3,5
Rz [µm]	9,267	10,382	8,734	**8,502**	10,252	9,712	10,811
Ra [µm]	2,13	2,324	1,97	**1,833**	2,205	2,031	2,331
t= 2 [mm]	100 %	110 %	120 %	**130 %**	90 %	80 %	70 %
tlak plynu [bar]	7	7,7	8,4	**9,1**	6,3	5,6	4,9
Rz [µm]	9,64	12,237	11,93	**9,541**	11,09	12,55	11,03
Ra [µm]	2,069	2,526	2,532	**2,103**	2,602	2,666	2,392
t= 3 [mm]	100 %	110 %	120 %	**130 %**	90 %	80 %	70 %
tlak plynu [bar]	9	9,9	10,8	**11,7**	8,1	7,2	6,3
Rz [µm]	15,417	11,142	12,699	**10,123**	12,87	12	11,17
Ra [µm]	3,285	2,481	2,888	**2,203**	2,629	2,673	2,481

Tab. 5 Tabulka hodnot pro změnu řezné rychlosti.

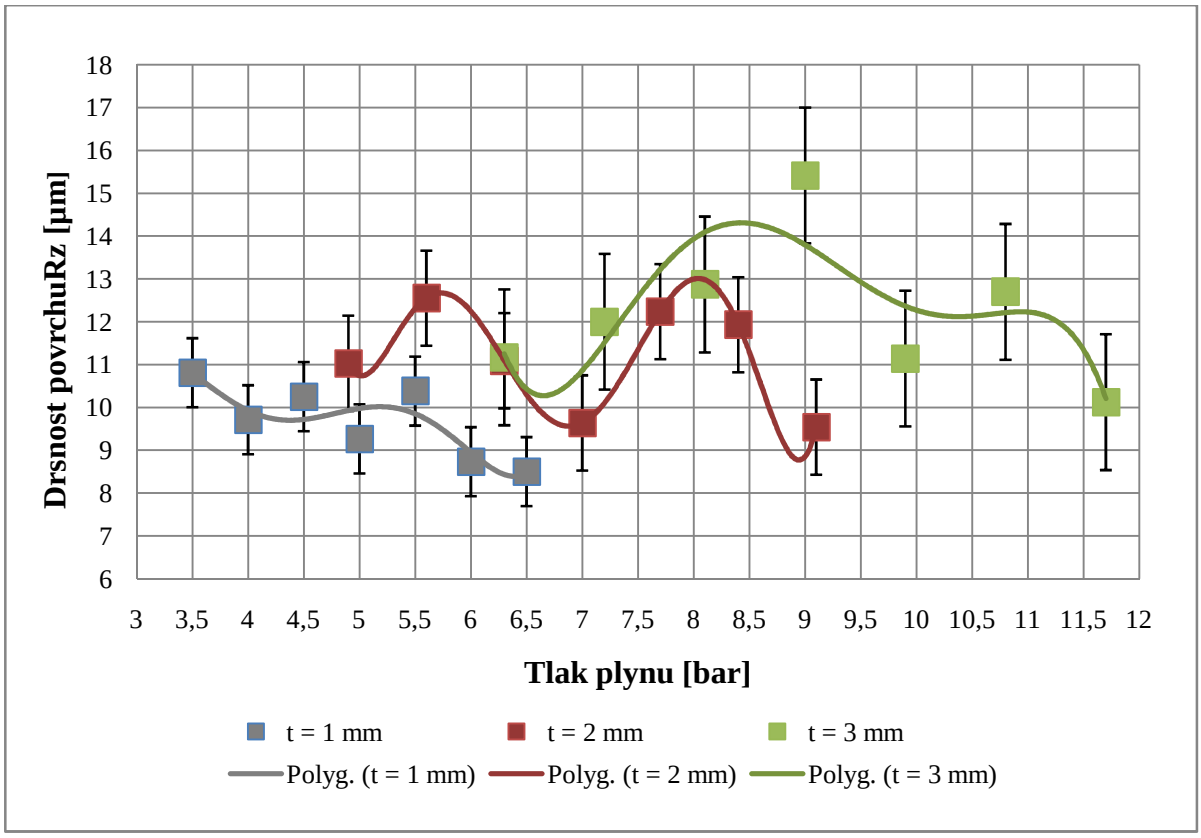
t= 1 [mm]	100 %	110 %	120 %	130 %	90 %	80 %	**70 %**
řez. rych. [mm.s^{-1}]	60	66	72	78	54	48	**42**
Rz [µm]	9,267	9,308	8,997	10,502	10,128	9,47	**8,526**
Ra [µm]	2,13	1,996	1,96	2,11	2,226	2,095	**1,921**
t= 2 [mm]	100 %	110 %	120 %	130 %	90 %	80 %	**70 %**
řez. rych. [mm.s^{-1}]	50	55	60	65	45	40	**35**
Rz [µm]	9,64	9,474	10,643	10,309	9,836	11,84	**8,999**
Ra [µm]	2,069	2,179	2,403	2,398	2,143	2,529	**2,064**
t= 3 [mm]	100 %	110 %	120 %	**130 %**	90 %	80 %	70 %
řez. rych. [mm.s^{-1}]	60	66	72	**78**	54	48	42
Rz [µm]	15,417	10,725	12,547	**10,654**	11,98	11,53	11,65
Ra [µm]	3,285	2,356	2,644	**2,276**	2,645	2,585	2,482



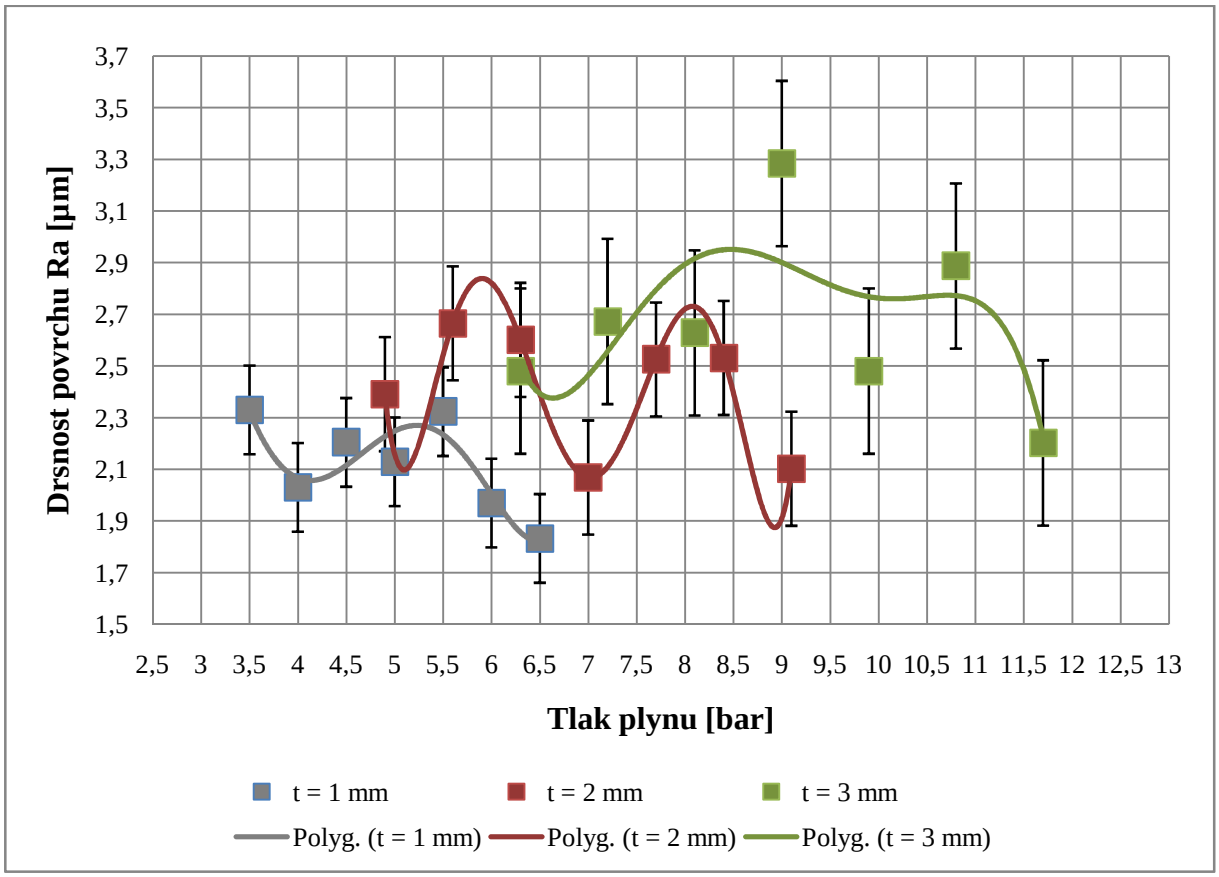
Obr. 36 Graf závislosti Rz a výkonu.



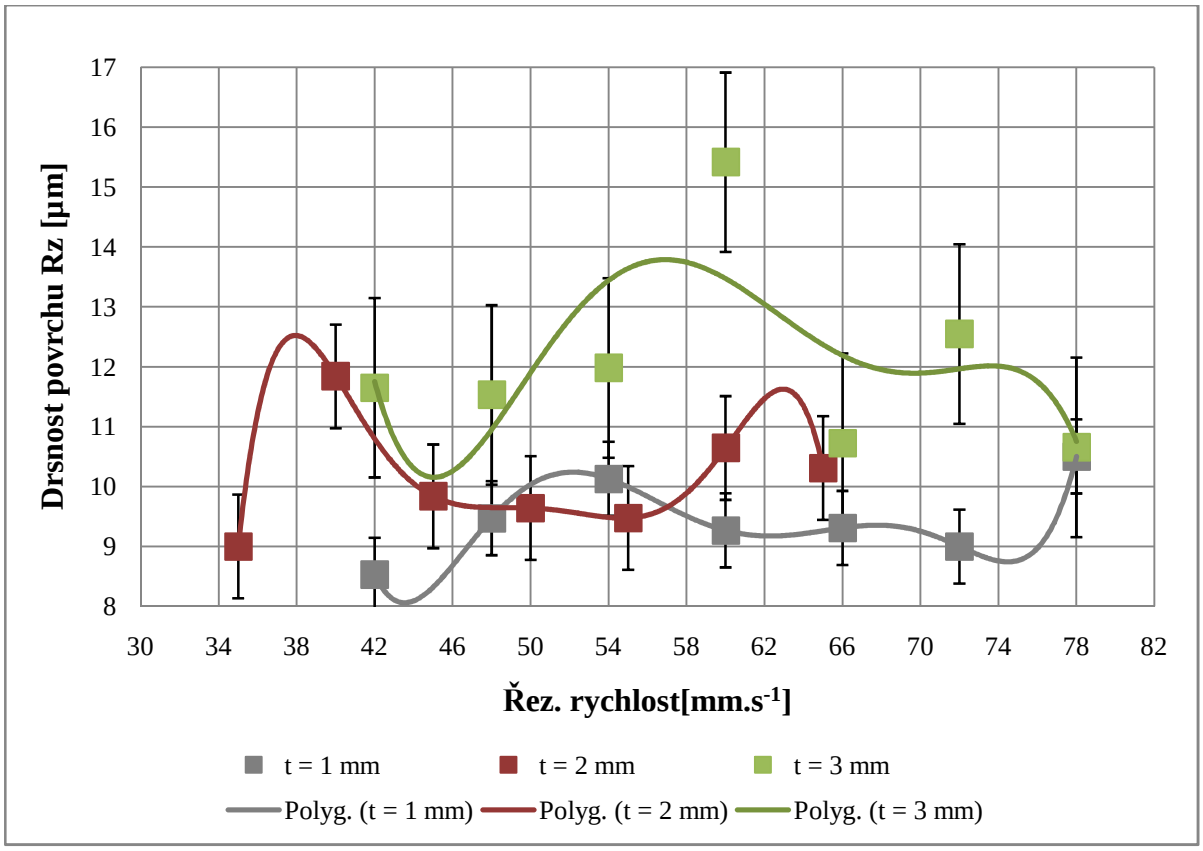
Obr. 37 Graf závislosti Ra a výkonu.



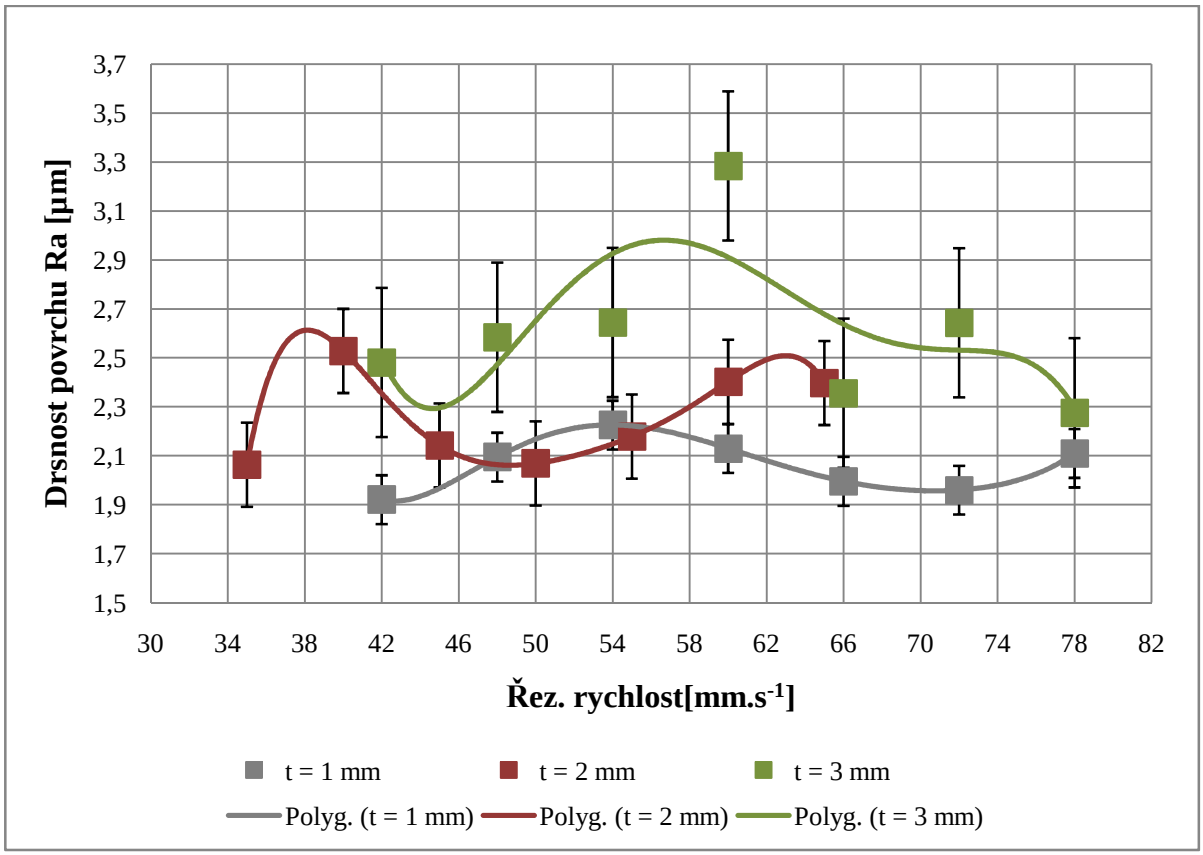
Obr. 38 Graf závislosti Rz a tlaku plynu.



Obr. 39 Graf závislosti Ra a tlaku plynu.



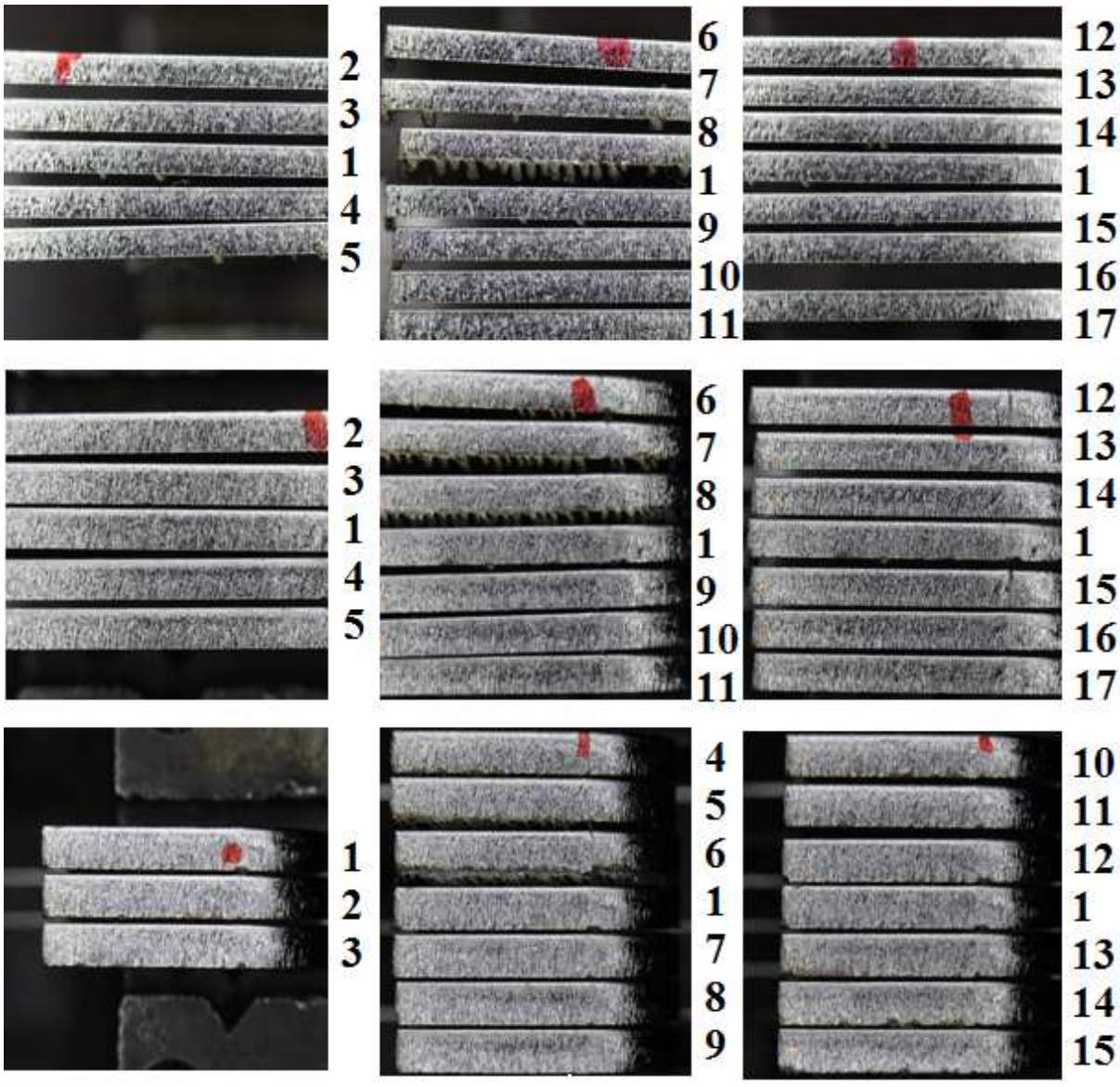
Obr. 40 Graf závislosti Rz a řezné rychlosti.



Obr. 41 Graf závislosti Ra a řezné rychlosti.

4.6 Makro fotografie řezných hran

Drsnost řezaných hran vzorků je téměř srovnatelná. U některých můžeme sledovat vznik otřepů, především u vzorků řezaných s proměnným tlakem. Vzorky řezané tavným režimem nevykazují klasické rýhování, jako tomu je např. u oxidačního řezání. Pro tavný režim je to typické. Způsobeno to může být několika faktory, např. rozdílnou absorpcí záření, stupněm polarizace a další. Lze říci, že na drsnost plochy má nejmenší vliv výkon, u změny tlaku plynu se tvořily otřepy a při změně řezné rychlosti nepatrné defekty spodní hrany řezu (spáleniny). První sloupec na obrázku 42 zachycuje změnu výkonu, druhý sloupec změnu tlaku plynu a třetí sloupec změnu řezné rychlosti. První řádek náleží vzorkům o tloušťce 1 mm, druhý řádek vzorkům s tloušťkou 2 mm a poslední 3 mm.



Obr. 42 Makro fotografie vzorků.

4.7 Charakteristika materiálu [26], [7], [31]

Použitý materiál pro vzorky je chrom – niklová austenitická korozivzdorná ocel, označení dle normy DIN X5CrNi18-10 (1.4301), dle ČSN 17 240. Ocel se používá pro běžné produkty, gastronomická zařízení, zařízení čov, vnější konstrukce, externí architekturu. Materiál se běžně používá tam, kde jsou kladeny malé protikorozní nároky. Použití je do provozní teploty až 350 °C. Ocel je hůře obrobitelná, je nutno ji obrábět nástroji z vysoce legovaných rychlořezných ocelí nebo nástroji vyrobených z tvrdokovu. Ocel lze dobře tvářet tažením a ohýbáním a má dobré mechanické vlastnosti při nízkých teplotách.

Tab. 6 Tabulka chemického složení materiálu. [26], [7], [31]

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
<= 0.07	<= 1.00	<= 2.00	max. 0.045	max. 0.030	<=0.11	17,00–19,50	8,00–10,50

Tab. 7 Tabulka mechanických a fyzikálních charakteristik. [15]

Mechanické a fyzikální vlastnosti	Označení, jednotka	Hodnota
Mez pevnosti	R_m [MPa]	520–720
Mez kluzu	$R_{p0,2}$ [MPa]	250
Tažnost	A [%]	20
Hustota	ρ [kg.dm^{-3}]	7,9
Youngův modul pružnosti	E [GPa]	200
Tvrdost podle Brinella	HB [-]	215

5 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [45], [17], [5], [46], [23], [25], [30], [40]

Pro dělení plechů se do popředí dostává laserové pálení, avšak je nutno zvážit několik pohledů na věc. Ne pro všechny případy je tato metoda vhodná. Při velkosériové výrobě a jednoduché součásti je dobré uvažovat například o stříhání, vysekávání a podobných variantách (nižší náklady na výrobu, ovšem zase je drahý nástroj). Laserové dělení však nebudeme porovnávat s mechanickým principem dělení materiálů, ale jen s tepelnými metodami. Nasazení laserové technologie se hodí do kusové (atypické díly složité součásti, specifický materiál a podobně) až po malosériovou výrobu. Metoda po ekonomické stránce konkuruje ostatním metodám pro daný rozsah tloušťek. Obecně se používá pro tenké plechy do 30 mm.

Ukázka dosažitelnosti kvality řezů v různých tloušťkách je na obrázku 43. Laserové dělení materiálu má svoje zvláštnosti. Nelze měnit kvalitu řezu v různých stupních nastavením řezných parametrů. Vždy nastavujeme optimální řezné parametry. Z toho důvodu experimentálně ověřujeme změny řezných parametrů.

Například jedna z technicko-ekonomických variant je změna režimu řezání. U nerez oceli lze změnit režim z tavného (místo dusíku použít kyslík – lesklý kvalitní řez) na oxidační (kvalita řezu horší, řez je černý, zoxidovaný a drsný). Ale dosáhneme cenové úspory přibližně 20 %. Obrázek 44.

Obr. 43 Dosažitelnost kvality řezu u nerez oceli. [23]

Obr. 44 Tavný a oxidační režim. [23]

Dle firem nabízejících řezání laserem nebývá ve většině případů stanovena cena na jeden metr řezu, případně na jednu hodinu práce, protože cena výpalků se skládá z mnoha proměnných – druh a tloušťka materiálu, složitost geometrie, počtů vpichů, otvorů, sériovost výroby, celkový objem zakázky, manipulační náročnosti. Firma IKOV TRADE uvádí informativní ceny, které jsou znázorněny v tabulkách 8 a 9 jen pro nerez ocel. Uvádí i další tepelné metody dělení.

Tab. 8 Ceny laserového řezání na 1 m. [24]

Laser			
síla plechu	cena za 1 m [Kč]	zápal	pulz. díra
1	20	1	
1,5	24	2	
2	26	2	
3	30	4	
4	40	5	4
5	45	5	4
6	85	5	8
8	190	8	15

Tab. 9 Ceny dalších metod tepelného dělení. [24]

Plazma			Plamen			Vodní paprsek	
síla plechu	1 hořák/1m	propal	síla plechu	1 hořák/1m	propal	síla plechu	cena [Kč]
1 až 2	28	4	8 až 15	45	4	1	53
2 až 3	36	5	16 až 25	58	5	2	58
4 až 6	45	6	26 až 35	70	7	3	69
			120 až 140	283	63	4	93
						5	118
						6	138
						100	6803

Před každým návrhem výroby je nutno se rozhodnout, jakou metodu a postup pro daný výrobek zvolit. Příklad, jak se rozhodnout při volbě.

- Tloušťka materiálu:
  - Do 2 mm – použijeme laser.
  - Do 3 mm – použijeme plazmu nebo laser.
  - Do 6 mm – použijeme vodní paprsek, plazmu nebo laser.
  - Více než 200 mm – použijeme kyslík.
  - Více než 50 mm – použijeme kyslík nebo vodní paprsek.
  - Více než 30 mm – použijeme plazmu, kyslík nebo vodní paprsek.
- Zvážit požadavky na přesnost a kvalitu hran:
  - Je pro nás přijatelná kvalita hrany při řezání plazmou? Většinu výrobků z oceli lze bez problému svařovat i po řezání plazmou.
  - Je pro nás přijatelná tepelně ovlivněná zóna vznikající při řezání kyslíkem, plazmou a laserem? Pokud ne, použijte vodní paprsek.
- Zvážit, co je důležitější: Produktivita, nebo náklady?
  - Je-li nejdůležitější rychlost výroby, je volbou vodní paprsek.
  - Jsou-li důležité nízké počáteční investice a provozní náklady, zvolte kyslík.
- Tolerance pro následné operace:
  - Můžete tolerovat občasnou strusku na spodní straně desky? Pokud ne, použijte vodní paprsek nebo laser.
  - Vyžadují další operace dokonale kruhové otvory? Pokud ano, použijte vodní paprsek nebo laser (pozor kuželovitý otvor) nebo nepřesnější metodu vystřižení otvoru.
- Multiprocesní řezání

Faktorem, který může zkomplikovat kalkulaci, je idea multiprocesního řezání, tedy použití dvou řezacích postupů na jednu součást. V praxi se používá kombinace plazmy a autogenu.

Díky vláknovým laserům lze kombinovat laser a plazmu nebo laser a kyslíkový plamen. V praxi tyto kombinace nejsou běžné, objevují se kombinace řezání laserem a cnc vysekávacích automatů. Např. oblouky se vysekávají a obvod se řeže laserem (rychlejší a levnější).

Výběrem metody a dalších postupů nalezneme optimální řešení. Optimální postup pro některé součásti musíme zjistit experimentálně. Součástku opracujeme více metodami a vybereme tu nejvhodnější.

Kalkulace ceny na hodinu

Náklady se skládají z:

- Odpisů/leasingu.
- Elektrické energie.
- Dalších médií (plyny).
- Mzdy operátora.
- Nástrojů.
- Spotřebních dílů.
- Servisu, údržby.
- Režie (provoz firmy).
- Zisku.
- Efektivity (sériovost, výměna nástrojů, prostoje, zadání programů).

Tab. 10 Hodinová sazba laseru. [40]

50 týdnů/rok		celkem hodin/rok	6000
3 směny		doba odpisů	5
5 dní/týden			
	cena na jednotku		
odpisy	15000000	30000	500
el. energie	4,5/kWh	příkon 40	180
řezný dusík	100 Kč/m3	5nm3/hod	500
mzda operátora	160 Kč/hod	33 % odvody	213
spotřební díly	50000 Kč/rok		8
servis	120000		20
celkem			1421
režie		180 %	2558
zisk		10 %	2814

Jedná se o teoretickou ukázku výpočtu hodinového nákladu na provoz laseru (tabulka 10). Nemáme vstupy ze zavedené firmy. Součástí práce není konkrétní výrobek, nemáme co kalkulovat, a tudíž jak porovnat vhodnější metodu dělení. V tomto případě bychom mohli porovnat řezání laserem, plazmou, plamenem a vodním paprskem. Můžeme provést porovnání tepelného dělení materiálu vůči mechanickému. Každá technologie je různě efektivní pro různé série, samozřejmě se i prolínají.

Při příliš vysoké ceně se snažíme optimalizovat výrobu.

- Optimalizace řezné dráhy, úprava geometrie – zaoblení rohů.
- Postupné řezání, změna režimu řezání.
- Optimalizace řezného plánu, zvolit jinou technologii.

Porovnání vzorků dle ekonomického hlediska

Z ekonomického hlediska nejvíce ovlivňuje, co se týče procesních parametrů, výslednou cenu řezná rychlost. Provedeme porovnání cen jednoho metru řezu při dosažených drsnostech. Jako výchozí hodinou cenu laseru použijeme hodnotu určenou v tabulce 10 a to 2814 Kč.hod^{-1}. Procentuálně porovnáme vždy nejlepší a nejhorší dosaženou drsnost. Výsledná cena jednoho metru řezu není konečná, v hodinové sazbě za laser nemáme započítaný čas na výměnu polotovaru, vyjmutí obrobku a podobně. Převod mezi jednotkami rychlosti je následující: 1 mm.s^{-1}=3,6 m.h^{-1}. Poté vydělíme hodinou sazbu za laser řeznou rychlostí v m.h^{-1} a získáme cenu řezu na jeden metr.

V tabulkách 11, 12 a 13 jsou výsledky pro každou sadu vzorků. Vždy uvedena nejlepší a nejhorší drsnost pro danou sadu vzorků a cena řezu za 1 metr pro příslušnou řeznou rychlost. U sady vzorků s tloušťkou 3 mm není procentuální vyjádření snížení ceny na úkor zhoršení drsnosti, jelikož nejkvalitnějšího řezu bylo dosaženo při nejvyšší řezné rychlosti v rozsahu experimentu.

Tab. 11 Technicko - ekonomické srovnání vzorků o tloustce 1 mm.

t= 1 mm	řezná rychlost [mm.s^{-1}]		Procentuální snížení ceny při zhoršení drsnosti.
	42	78	
Rz [µm]	8,526	10,502	47%
cena za 1 m [Kč]	18,61	10,02	

Tab. 12 Technicko - ekonomické srovnání vzorků o tloustce 2 mm.

t= 2 mm	řezná rychlost [mm.s^{-1}]		Procentuální snížení ceny při zhoršení drsnosti.
	35	40	
Rz [µm]	8,999	11,84	13%
cena za 1 m [Kč]	22,33	19,54	

Tab. 13 Technicko - ekonomické srovnání vzorků o tloustce 3 mm.

t= 2 mm	řezná rychlost [mm.s^{-1}]	
	78	60
Rz [µm]	10,654	15,417
cena za 1 m [Kč]	10,02	13,03

Vzorky řezány s proměnným tlakem a výkonem dosahovali téměř totožných výsledků jako při změně rychlosti. V těchto případech jsou finanční dopady minimální vůči řezné rychlosti, takže je doporučeno řezat s vyšším výkonem, v případě potřeby i vyšším tlakem plynu, protože se dosahuje lepších hodnot drsnosti.

6 DISKUZE A ZÁVĚRY

Laserové dělení materiálů je ve strojírenství téměř běžnou praxí. Ve strojírenství se nejčastěji využívají CO_2 lasery, avšak velmi se rozšiřují pevnolátkové vláknové lasery kvůli svým výhodám. Laserové dělení materiálu má svoje specifika. Při laserovém dělení materiálu nelze měnit kvalitu řezu v různých stupních nastavením řezných parametrů. Vždy hledáme a nastavujeme optimální řezné parametry a tím dosáhneme optimální kvality řezu. Z toho vyplývají určité charakteristiky pro dané materiály a tloušťky, u slabších materiálů lze očekávat řez hladký, rovný a bez okují. S narůstající tloušťkou se objevuje typické drážkování, okuje, podřezávání a další.

Na základě zadání práce byl proveden experiment vlivu procesních parametrů na drsnost povrchu řezné hrany. Dělení materiálu probíhalo na pevnolátkovém laseru. Zkoušený materiál byl austenitická korozivzdorná ocel o tloušťkách 1, 2 a 3 mm. Byly změřeny hodnoty drsnosti, které se dle zadání zpracovaly. V grafech vidíme hledaná minima křivek. U těch, kde nejsou zcela zřetelná minima, by se mohlo pokračovat v experimentu nařezáním dalších vzorků s jinými parametry. U laseru hledáme ideální nastavení. Nejdříve se z technologického hlediska zabýváme řeznou rychlostí, následně tlakem plynu a naposled změnou výkonu. Z ekonomického hlediska je nejdůležitější řezná rychlost. Vyšší řezná rychlost zajistí kratší výrobní čas, tedy levnější výrobek. Při změně výkonu bylo dosaženo nejlepší drsnosti při hodnotách 100–90 % výchozího výkonu, což je z ekonomiky procesu nepodstatné. Při změně tlaku plynu se nejlepších výsledků dosáhlo navýšením o 30 % výchozí hodnoty, více plynu znamená dražší řez. U plechu 1 a 2 mm jsou hodnoty drsnosti téměř srovnatelné při řezání s výchozím tlakem. I při poklesu tlaku plynu o 20–30 % se dosahuje výsledků srovnatelných s řezáním při výchozím a navýšeném tlaku plynu. Také vznikaly velké otřepy. U plechu 1 a 2 mm bylo dosaženo nejlepší drsnosti při snížení rychlosti o 30 %, avšak hodnoty drsnosti jsou téměř stejné s hodnotami při zvýšení rychlosti o 20 %, takže z ekonomického hlediska lze řezat zvýšenou rychlostí, rozdíly v drsnosti jsou nepatrné. U 3 mm plechu bylo dosaženo nejlepších výsledků při navýšení rychlosti o 30 %. Bylo by požadováno lepších drsností, nutno snížit rychlost řezání, protože tavný režim není tak výkonný jako oxidační režim (nevzniká dodatečné teplo). Veškeré hodnoty drsnosti a především nejlepší výsledky jsou uvedeny v tabulkách 3 až 5. Hodnoty Rz jsme zanesli do příslušného grafu vycházejícího z normy ČSN EN ISO 9013. Lze vidět, že hodnoty se drží v malém rozmezí a téměř všechny spadají do tolerančního pole 1, u materiálu s tloušťkou 3 mm cca půlka hodnot spadá do tolerančního pole 2.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [9]

1. AMADA AMERICA, Inc. *Cutting Know-how for Amada lasers* [online]. Schaumburg, 2011 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.amada.com/.

2. JELÍNKOVÁ, Helena. *Aplikace laserů* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1998 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://pascal.fjfi.cvut.cz/~drska/edu/webfyz/lasery/.

3. Autoforum.cz. *Laserový odstraňovač rzi je úžasně efektivní, zní jako světelný meč* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.autoforum.cz/zajimavosti/laserovy-odstranovac-rzi-je-uzasne-efektivni-zni-jako-svetelny-mec/.

4. BAZALOVÁ, Lucie. *Porovnání vlastností pevnolátkových laserů* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/4445. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

5. BEMETAdesign.cz. *Řezání laserem* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.bemetadesign.cz/rezani-laserem.html

6. BENKO, Bernard, Peter FOLDEREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. Laserové Technológie. 1. vyd. Bratislava: Tlač vydavateľstvo STU v Bratislavě, 2000. ISBN 80-227-1425-9.

7. Bolzano.cz. *Oceli austenitické* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke

8. KUSALA, Jaroslav. *Cesta k objevu* [online]. 2004 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>.

9. VUT Brno. *CITACE PRO. Generátor citací* [online]. 2013, VUT Brno [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://citace.lib.vutbr.cz/info.

10. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. 4. přeprac. vyd., 2. v nakl. CERM. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 176 s.: il. ISBN 80-214-3070-2.

11. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.

12. ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu.* 1. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2003.

13. ČSN EN 12584. *Vady při řezání kyslíkem, laserem a plasmou - Terminologie*. 2001. Praha: Český normalizační institut.

14. DOČEKAL, Miroslav. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb-YAG laserem* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/27382. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

15. DRÁBEK, Michal. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2016-05-09]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/5176.

16. ENGST, Pavel a Milan HORÁK. *Aplikace laserů*. Praha: SNTL, 1989, 204 s.

17. ESAB.cz. *Jak nejlépe řezat ocelové plechy* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.esab.cz/cz/cz/education/blog/what-is-the-best-way-to-cut-steel-plate.cfm.

18. Golden Laser.org. *Laser Welding Machine* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.goldenlaser.org/m_product/21-Fiber-Laser-3D-Cutting-Robot-Arm.html.

19. Gymnázium a Střední odborná škola Podbořany, p.o. *Řezání kyslíkem* [online]. Podbořany [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-t2-10_rezanikyslikem.pdf

20. HARČARÍK, Matej. *Hodnocení textury povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/31888. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Róbert Jankových.

21. HS - TECH. *Řezání laserem* [online]. Lanškroun, 2013 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.hs-tech.cz/rezani-laserem

22. CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi I,* Přednáška č. 4 [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_4prez.pdf

23. CHPS S.R.O. *Chps* [online]. 2008 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.chps.cz

24. IKOV TRADE. *Řezání plechů* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.ikovtrade.cz/rezani-plechu.php.

25. INDRA, Jaroslav. *Nekonvenční technologie laserového řezání* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/16874. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička.

26. Inox, spol s.r.o. *Nerezová ocel* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html

27. KACHTÍK, Lukáš. *Součásti laseru. Princip laseru* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://lasery.wz.cz/princip.html

28. KANDUS, Bohumil, Jaroslav KUBÍČEK a Oldřich AMBROŽ. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.

29. KAŠPAR, Ladislav. *Analýza konvenční technologie dělení materiálu* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2008 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/6241. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

30. KOLKOP, David. *Technologie řezání laserem* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/12197. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička.

31. ALU KÖNIG FRANKSTAHL s.r.o. *Charakteristika nerezových ocelí* [online]. Praha, 2015[cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.akfs.cz/akfs/index.php?menu=234

32. KOŘÁN, Pavel. Lao Lasery a optika. Seriál na téma lasery [online]. Praha, 20.05.2011 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery

33. LAPŠANSKÁ, Hana. 2010. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc. ISBN 978-80-87240-65-6.

34. Laser-Tech.cz. *Řezání laserem* [online]. Olomouc, 2015 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.laser-tech.cz/rezani-laserem/

35. Leonardo technology. *Lasery info learnig* [online]. Hlohovec, 2005 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?start=1.

36. Lintech. *Laserové technologie* [online]. Domažlice, 2009 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.lintech.cz/laserova-technologie

37. MetalPro Vysočina s.r.o. *Řezání plazmou* [online]. Měřín, 2015 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.rezani-plazma.cz/.

38. MIDRLA, Zdeněk. *Řezání abrazivním vodním paprskem* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/27185. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička.

39. MRŇA, Libor. Osobní rozhovor. Brno, 16. 5. 2016.

40. MRŇA, Libor. Ekonomika technologií [online]. Brno: VUT FSI, 2015 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/ekonomika_technologii__mrna.pdf.

41. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani_laserem_2013__mrna.pdf.

42. MRŇA, Libor. *Základy laserové technologie* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techniky_2013__mrna.pdf.

43. Nitara. *Řezání a popisování laserem* [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://www.nitara.cz/index.php?stred=galerie&galerieid=5

44. POKORÁK, Milan. Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/5174. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

45. POLÁK, Marek. +*Nasazení řezání laserem při výrobě součástí manipulační techniky* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/13376. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička.

46. POLÁŠEK, Marek. *Studium závislosti geometrie koutového svaru na procesních parametrech při laserovém svařování korozivzdorné oceli* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/40510. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

47. Rofin. *Disc laser principle* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.laserresources.com.au/rofin/home.htm.

48. ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. Lasery, laserové technologie a troje s laserem [online]. *MM průmyslové spektrum*. 2006, roč. 2006, č. 7,17.07.2006 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-slaserem.html.

49. TRUMPF Česká Republika. *Oblasti použití* [online]. 2011 [cit. 2016-05- 09]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblastipouziti.html>.

50. VACULKA, Jakub. *Měření drsnosti hran při laserovém dělení kovů* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/5146. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

51. ZATLOUKAL, Petr. *Welding* [online]. 2007 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
Al	Hliník	
Ar	Argon	
C	Uhlík	
C_2H_2	Acetylén	
CO_2	Oxid uhličitý	
Cr	Chrom	
Cu	Měď	
DPSS	Diode-pumped Solid-state	
E	Youngův modul pružnosti	[GPa]
HB	Tvrdost podle Brinella	
He	Helium	
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesílení světla stimulovanou emisí záření	
LED	Light Emitting Diode	
LPSS	Litrion-pumped Solit-state	
Mn	Mangan	
Mo	Molybden	
N_2	Dusík	
Nd:YAG	Neodym:Yttrium Aluminium Grenade	
Ni	Nikl	
O_2	Kyslík	
P	Fosfor	
polyg.	Polynomická funkce	
Rm	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	[MPa]
S	Síra	
Si	Křemík	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
WIG	Wolfram Inert Gas	
Yb	Ytterbium	
ρ	Hustota	[kg.dm-3]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Řezání vzorků. 9
Obr. 2 Ilustrativní obrázek [21] 9
Obr. 3 2D pálení laser [34] 11
Obr. 4 3D laser robot [18] 11
Obr. 5 Základní schéma laseru [32] 12
Obr. 6 Fyzikální princip laseru [35] 12
Obr. 7 Rozdílné vlastnosti paprsku světelných zdrojů [35] 13
Obr. 8 Rozdělení laserů [4] 14
Obr. 9 Nd:YAG laseru [32] 15
Obr. 10 Popis diskového laseru [4] 16
Obr. 11 Detail optického vlákna [42] 16
Obr. 12 Princip čerpání aktivního vlákna přes plášť [22] 17
Obr. 13 Princip vláknového laseru [32] 17
Obr. 14 Plynový laser [32] 18
Obr. 15 Ilustrativní příklad použití [43] 19
Obr. 16 Ilustrativní příklad použití [49] 19
Obr. 17 Proces svařování laserem-kondukční a penetrační [32] 19
Obr. 18 Schéma laserového vrtání [49] 20
Obr. 19 Ablační čištění [3] 20
Obr. 20 Schéma laserového řezání [32] 21
Obr. 21 Princip řezání kyslíkem [19] 23
Obr. 22 Vliv výkonu na povrch řezu - malý výkon - optimální – velký [41] 24
Obr. 23 Vliv řezné rychlosti - malá rychlost - optimální – velká [41] 25
Obr. 24 Vliv tlaku plynu - malý tlak - optimální – velký [1] 25
Obr. 25 Otřepy - slzovitý, struskovitý, ostrý [49], [50] 26
Obr. 26 Výmol [49], [50] 27
Obr. 27 Skluz [50] 27
Obr. 28 Profil povrchu [10] 28
Obr. 30 Zobrazení Ra [14] 29
Obr. 29 Zobrazení Rz [10] 29
Obr. 31 Zvětšení části grafu [12] 30
Obr. 32 Graf vycházející z normy ČSN EN ISO 9013 [12] 30
Obr. 33 Schéma dotykového měřicího přístroje [44] 31
Obr. 34 Profilometr Mahr Marsurf M300. 31
Obr. 35 Vlastní měření drsností. 32
Obr. 36 Graf závislosti Rz a výkonu. 34
Obr. 37 Graf závislosti Ra a výkonu. 34
Obr. 38 Graf závislosti Rz a tlaku plynu. 35
Obr. 39 Graf závislosti Ra a tlaku plynu. 35
Obr. 40 Graf závislosti Rz a řezné rychlosti. 36
Obr. 41 Graf závislosti Ra a řezné rychlosti. 36
Obr. 42 Makro fotografie vzorků. 37

Obr. 43 Dosažitelnost kvality řezu u nerez oceli [23] 39
Obr. 44 Tavný a oxidační režim [23] 39

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání laserů [32], [42] 18
Tab. 2 Toleranční pole Rz5 [12] 30
Tab. 3 Tabulka hodnot pro změnu výkonu. 33
Tab. 4 Tabulka hodnot pro změnu tlaku plynu. 33
Tab. 5 Tabulka hodnot pro změnu řezné rychlosti. 33
Tab. 6 Tabulka chemického složení materiálu [26], [7], [31] 38
Tab. 7 Tabulka mechanických a fyzikálních charakteristik [15] 38
Tab. 8 Ceny laserového řezání na 1 m [24] 39
Tab. 9 Ceny dalších metod tepelného dělení [24] 40
Tab. 10 Hodinová sazba laseru [40] 41
Tab. 11 Technicko – ekonomické srovnání vzorků o tloušťce 1 mm 42
Tab. 12 Technicko – ekonomické srovnání vzorků o tloušťce 2 mm 42
Tab. 13 Technicko – ekonomické srovnání vzorků o tloušťce 3 mm 42