



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MĚŘENÍ DRSNOSTI ŘEZNÝCH HRAN PŘI
LASEROVÉM DĚLENÍ KOVŮ Yb - YAG LASEREM
MEASUREMENT OF ROUGHNESS OF THE LASER CUTTING EDGE BY Yb - YAG LASER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE:
AUTHOR

MIROSLAV DOČEKAL

VEDOUCÍ PRÁCE:
SUPERVISOR

RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Miroslav Došek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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

Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb-YAG laserem

v anglickém jazyce:

Measurement of roughness of the laser cutting edge by Yb-YAG laser

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Změření drsnosti řezných hran ocelových plechů v rozsahu tloušťky 1 - 20 mm při tvárném a
oxidačním způsobu řezání. Srovnat s údaji v normě SN EN ISO 9013.

Cíle bakalářské práce:

Osvojit si základy laserového dělení materiálů. Osvojit si základy měření drsnosti.

Seznam odborné literatury:

1. BENKO B., FODEREK P., KOSE EK M., BIELAK R.I: Laserové technologie,1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
2. KOLEKTIV AUTOR . Technologie svařování a zařízení, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
3. KOLEKTIV AUTOR . Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Libor Mráza, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 2.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
editel ústavu

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

ABSTRAKT

DOČEKAL Miroslav: Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb - YAG laserem.

Projekt vypracovaný v rámci bakalářského studijního programu B - STG Strojírenská technologie (2303R002) hodnotí drsnosti řezných hran ocelových plechů při laserovém řezání dle normy ČSN EN ISO 9013. Hodnocené vzorky byly řezány na Yb - YAG laseru. Celkem bylo měřeno 11 vzorků. Vzorky byly ze třech druhů materiálu a byly řezány dvěma způsoby laserového dělení tavným způsobem a oxidačním způsobem. Vzorky z nerezové oceli X10CrNi18-8 byly řezány tavně a zbylé vzorky z oceli DC 01 a z oceli S235 JRG byly řezány oxidačním způsobem. Vzorky jsou hodnoceny dle normy ČSN EN ISO 9013. Norma hodnotí kvalitu řezu při tepelném dělení materiálu a zařazuje jednotlivé řezy do tříd přesnosti. Vzorky z nerezové oceli se pohybují v první a druhé třídě přesnosti. Vzorky z konstrukční oceli se všechny zařazují do druhé třídy přesnosti. Toto zařazení je výsledkem praktické části projektu. Teoretická část práce popisuje základní princip laseru, jeho části, použití v průmyslové praxi a nejčastěji používané lasery v průmyslu. Zvláště se zaměřuje na řezání laserem a na parametry, které mají při řezání laserem vliv na kvalitu řezu. Dále je popsáno měření drsnosti a norma ČSN EN ISO 9013.

Klíčová slova: Laserové řezání, řezná hrana, Yb - YAG laser, tavný způsob řezání, oxidační způsob řezání, nerezová ocel X10CrNi18-8, ocel DC 01, ocel S235 JRG, třída přesnosti

ABSTRACT

DOČEKAL Miroslav: Measurement of roughness of laser cutting edge in cutting by Yb -YAG laser.

The project carried out in the bachelor's degree program B - STG ("Mechanical Engineering Technology", 2303R002), evaluates the roughness of the cutting edges of steel plates cut by laser according to the ČSN EN ISO 9013 standard. The test samples were cut by Yb - YAG laser. In total, 11 samples were measured. The samples represent three kinds of material and were cut by two ways of laser cutting; the fusion method and the oxidation method. The samples of stainless steel X10CrNi18-8 were cut by the fusion method and the remaining samples of the DC 01 steel and S235 JRG steel were cut by the oxidation method. The samples were evaluated according to the ČSN EN ISO 9013 standard. The standard evaluates the quality of cut in thermal cutting and classifies individual cuts into accuracy classes. The samples of stainless steel fall into the first and second classes of accuracy. The samples of structural steel all fall into the second class of accuracy. This classification is the outcome of the practical part of the project. The theoretical part deals with the basic principle of laser, its parts, the industrial use of lasers and the lasers most commonly used in industry. It focuses particularly on laser cutting and the parameters which affect the quality of the cut in laser cutting. The measuring of roughness and the ČSN EN ISO 9013 standard are also described.

Keywords: laser cutting, cutting edge, Yb - YAG laser, fusion cutting, oxidation cutting, stainless steel X10CrNi18-8, DC 01 steel, S235 JRG steel, accuracy class

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOČEKAL, Miroslav. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb - YAG*. Brno, 2013. 51 s, 9 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování. Vedoucí práce 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 Brně dne 24. 5. 2013

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017).

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Úvod	9
1 LASER a princip jeho činnost.....	10
1.1 Hlavní části laseru.....	11
1.2 Vlastnosti laserového paprsku	12
2 Dělení laserů	14
2.1 Plynové lasery	15
2.1.1 CO ₂ lasery.....	15
2.2 Pevnolátkové lasery	16
2.2.1 Nd: YAG laser	16
2.2.2 Diskové lasery	17
2.2.3 Vláknové lasery	18
2.3 Polovodičové lasery	18
2.4 Kapalinové lasery	19
3 Použití laserů	20
3.1 Vrtání laserem.....	20
3.2 Svařování laserovým paprskem	21
4 Řezání laserem.....	23
5 Kvalita řezu a řezné parametry	27
5.1 Vady řezu	30
6 Kvalita a drsnost povrchu	33
6.1 Měření drsnosti povrchu a parametrů textury povrchu.....	35
6.2 Norma ČSN EN ISO 9013	37
7 Praktická Část.....	39
7.1 Laser použitý pro řezání vzorků	39
7.2 Měřené vzorky	39
7.3 Řezné parametry při řezání vzorků.....	42
7.4 Měření drsnosti řezných hran vzorků	43
7.5 Vyhodnocení hodnot pro tavný způsob řezání nerezové oceli	44
7.6 Vyhodnocení hodnot pro oxidační způsob řezání uhlíkové oceli.....	48
8 Závěr.....	51

Seznam použitých zdrojů

Seznam symbolů a zkratk

Seznam příloh

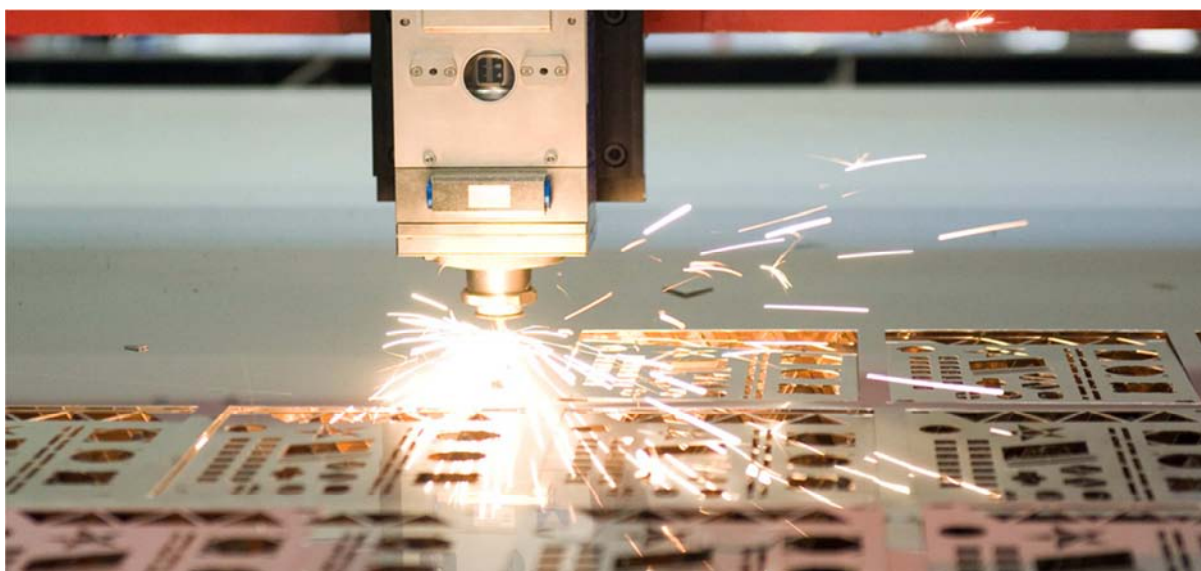
Seznam tabulek

Seznam vzorců

Seznam obrázků

ÚVOD

Hlavním úkolem této bakalářské práce je měření drsnosti hran ocelových plechů při laserovém dělení kovů. Drsnost bude měřena na jednotlivých vzorcích z ocelových plechů. Vzorky plechů budou děleny laserovým řezáním, a to dvěma způsoby laserového řezání, tavným a oxidačním způsobem. Vyhodnocované vzorky budou v rozsahu tloušťek od 1 – 20 mm. Jednotlivé způsoby řezání mohou být více či méně vhodné z hlediska kvality a přesnosti řezu pro určité tloušťky plechu a materiál. Kvalita řezu také velmi záleží na nastavených řezných parametrech. Každý způsob má své výhody a nevýhody. Změřením drsnosti řezných hran lze posoudit kvalitu řezu. Naměřená drsnost bude zpracována a srovnána s normou ČSN EN ISO 9013. Bude provedeno vyhodnocení a zařazení jednotlivých řezů do tříd přesnosti dle této normy. Norma se zabývá tepelným dělením, klasifikuje řezy, jež jsou prováděny tepelným způsobem dělení. Tato norma také klade požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu.



Obr. č. 1 Ilustrativní obrázky laserového řezání [2], [10], [13]

1 LASER A PRINCIP JEHO ČINNOSTI [12], [18], [32], [41]

Laser je zkratka z anglického popisu děje Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, v překladu tento název znamená zesílení světla stimulovanou emisí záření. Princip laseru byl fyzikálně popsán v roce 1917 Albertem Einsteinem. Této formulaci předcházelo popsání základních zákonů kvantové elektrotechniky, které spolu s Einsteinem popsali M. Planck a N. Bohr. První laser byl sestaven v roce 1960 Theodorem Maimanem. Byl založen na ozařování krystalu syntetického rubínu.

Laser je zdroj vysokoenergetického elektromagnetického záření. Elektromagnetické záření je v laseru generováno pomocí stimulované emise fotonů. Samotnou podstatou tohoto jevu je přechod elektronu mezi energetickými hladinami v rámci atomu, iontu nebo molekuly, použít se dají i samotné elektrony.

Elektron, který se nachází na vzdálenější orbitální hladině například od jádra atomu, má větší energii než elektron, který se nachází blíže jádra na nižší energetické hladině atomu.

Při stimulované emisi fotonů je dodávána energie elektronům pomocí vhodného zdroje energie. Pokud je elektronu dodána energie, je vybuzen a přejde na vyšší energetickou hladinu. Poté je tento elektron stimulován k přechodu zpět na nižší energetickou hladinu. Tato stimulace je provedená ozářením vybuzeného elektronu. Záření, kterým se ozařuje vybuzený elektron, musí mít vhodnou vlnovou délku a frekvenci. Na toto ozářením reaguje elektron tak, že přejde z vyšší energetické hladiny zpět na nižší energetickou hladinu. Rozdíl energií mezi jednotlivými hladinami E_2 a E_1 je vyzářen v podobě dalšího fotonu. Tento foton má stejnou vlnovou délku, frekvenci a fázový posun v prostoru a čase jako má záření, které stimulovalo tento přechod elektronu. Děj exponenciálně narůstá a zesiluje se. Proces má charakter řetězové reakce, aby děj probíhal a záření bylo zesilováno, musí být větší počet elektronů, z celkového počtu elektronu ve vybuzeném stavu.

Energie, která je vyzářena elektronem, je rovna rozdílu energií energetických hladin. Tento rozdíl popisuje vztah [18]:

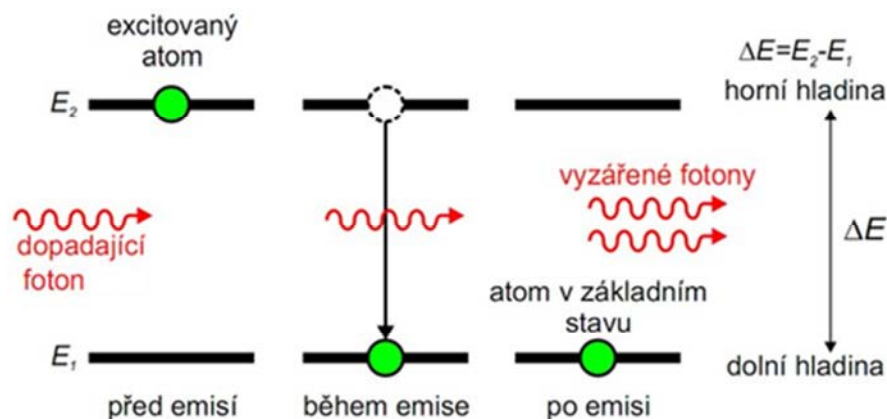
$$h \cdot f_{12} = E_2 - E_1 \quad [J] \quad (1.1)$$

Kde:

h - Planckova konstanta = $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

f_{12} - frekvence kmitání odpovídající přechodu E_1 až E_2

Děj stimulované emise záření je znázorněn na obrázku č. 2 [12]. Princip, kde při stimulaci přechází elektrony pouze mezi dvěma energetickými hladinami, je využíván u laserů, které pracují v pulsech. Pro kontinuální režim laseru je zapotřebí přechod elektronů mezi více energetickými hladinami.



Obr. č. 2 Princip stimulované emise záření [12]

1.1 Hlavní části laseru [17], [32], [41]

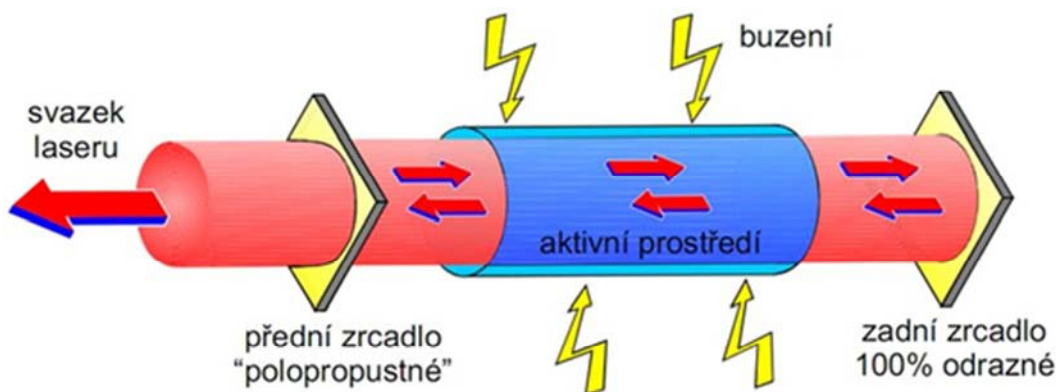
Potřebná energie pro přechod elektronů mezi jednotlivými hladinami se v laseru dodává zdrojem energie. Zdroj energie patří mezi jedny z hlavních částí laserů. Zdroj energie je také u laserů označován jako buzení. Buzení dodává energii do aktivního prostředí.

Tato energie je aktivním prostředím absorbována a způsobuje přechod elektronů v aktivním prostředí na vyšší energetické hladiny. Buzení může být ve formě elektrického výboje, chemické reakce, ozařování různými zdroji světla nebo ozařování jiným laserem (nejčastěji diodovým). Buzení je u různých typů laserů různé a záleží na aktivním prostředí.

Aktivní prostředí je vhodná látka. Může to být plyn nebo směs plynů, monokrystal, polovodič s P-N přechodem, organická barviva, polovodičové multivrstvy a volné elektrony. V této látce se nacházejí oddělené kvantové hladiny elektronů. Elektrony přechází mezi jednotlivými energetickými hladinami a tím vyzařují elektromagnetické záření.

Záření vyzářeno z aktivního prostředí je v rezonátoru zesilováno a převáděno do formy výstupního laserového záření. Rezonátor je optická dutina, nejčastěji tvořena dvěma zrcadly. V této dutině je umístěno aktivní prostředí. Zrcadla jsou od sebe vzdáleny o násobky vlnové délky výstupního laserového záření. Jedno zrcadlo v rezonátoru je částečně propustné a druhé je nepropustné. Nepropustné zrcadlo odrazí 100 % záření a je tvořeno nejčastěji dielektrickým zrcadlem, pro delší vlnové délky je tvořeno leštěnými kovy například mědí, zlatem. Částečně propustné zrcadlo odrazí 80-90% záření. Zbylé záření, které projde částečně propustným zrcadlem, tvoří výstupní laserové záření.

Záření v rezonátoru kmitá a tak působí energeticky na další elektrony. Dochází ke stimulované emisi fotonů. Vzniká elektromagnetické záření o stejné frekvenci a fázi. V rezonátoru dochází k exponenciálnímu zesilování tohoto děje. Základní schéma laseru je znázorněno na obrázku číslo 3 [17].



Obr. č. 3 Zjednodušené schéma laseru [17]

Jestliže je buzeno záření o velké vlnové délce, je zapotřebí většího rezonátoru. Pro zmenšení délky rezonátoru se volí uspořádání rezonátoru s více zrcadly. Zrcadla mohou být například tři - jsou uspořádána do trojúhelníku, existují i kruhové rezonátory.

Ostatní záření, směřující jiným směrem než ve směru zrcadel, je vyzářeno mimo rezonátor a je nevyužité. Tato energie se mění na teplo a proto je nutné u laserů s většími výkony intenzivně chladit. Důležité je chladit i aktivní prostředí, které se ohřívá a vlivem teploty může měnit svoje rozměry. Změna rozměrů aktivního prostředí nepříznivě ovlivňuje vlastnosti vyzařovaného paprsku. Tento jev se nazývá thermal lensing effect a objevuje se hlavně u pevnolátkových laserů.

Dále je důležitá optická soustava, která je tvořená zrcadly, clonami, čočkami u CO₂ laserů nebo optickými vlákny u pevnolátkových laserů. Optická soustava slouží k dopravě laserového paprsku ze zdroje záření do místa, kde bude paprsek vyzařován.

V optické soustavě může docházet k velkým ztrátám a jednotlivé části jako čočky, clony a zrcadla se mohou velice intenzivně zahřívat, proto musí být vyrobeny z vhodného materiálu, který co nejméně absorbuje záření. Lepší je dopravování laserového paprsku pomocí optického vlákna u pevnolátkových laserů, odpadá složitá optická soustava.

1.2 Vlastnosti laserového paprsku [14], [22], [24]

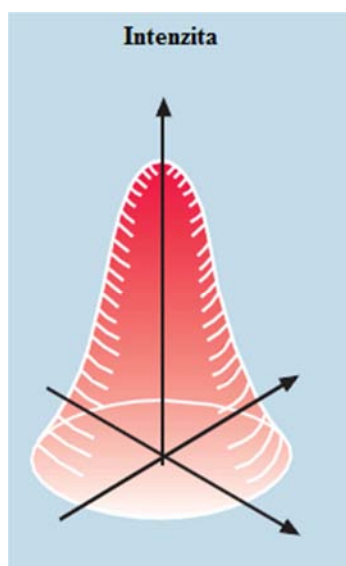
Elektromagnetické záření vycházející z laseru je monochromatické, to znamená, že záření má přesně definovanou vlnovou délku. Je koherentní - má stejný směr pohybu, a fázi nebo fázový posun v čase a prostoru. Laserový paprsek má malou rozbíhavost a lze zaostřit na velmi malý průměr. Tak lze soustředit velké množství energie na malou plochu.

Schopnost zaostření paprsku se nazývá fokusace a je závislá na vlnové délce. Čím je vlnová délka záření větší, tím je horší fokusace. Díky velmi vysoké fokusaci a vysoké energii, kterou paprsek nese je schopen tepelně ovlivňovat materiál, ohřívat ho, tavit i odpařovat.

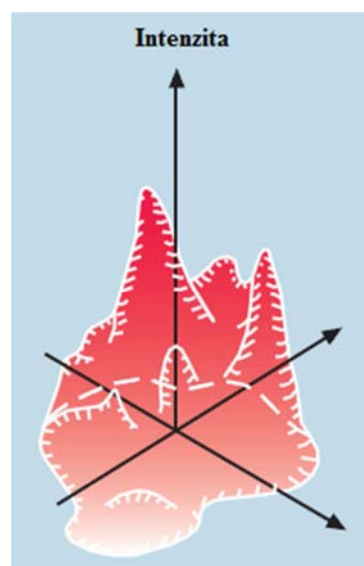
Rychlost laserového paprsku je rovna rychlosti světla. Rychlost světla ve vakuu je 299792458 m/s. Rychlost záleží na prostředí. V jiných prostředích, než ve vakuu je rychlost světla nižší.

Paprsek má v sobě soustředěnou velkou intenzitu výkonu. Tato intenzita je udávána ve W/cm², je to výkon připadající na plochu kolmou na směr šíření. Pokud se jedná o pulsní laser, tak na jeho výkon má vliv i frekvence vyzařovaných pulsů. Frekvence pulsů se udává v Hz. Je to počet pulsů vyzářených za 1 sekundu.

Intenzitu a její distribuci v laserovém paprsku popisuje módová struktura paprsku, označována jako TEM, je to zkratka z anglického slova transverse electromagnetic mode. TEM klasifikuje laserové záření podle příčného průřezu intenzity záření. Výsledný mód, jenž je vyzařován, záleží na mnoha faktorech. Mód je dán hlavně strukturou rezonátoru a optickou aparaturou a jejími vadami.



Obr. č. 4 TEM₀₀ - Gaussovo rozložení [24]



Obr. č. 5 Příklad TEM jiného než Gaussovo [24]

Ve výsledku by mělo vyzařování energie vypadat ve tvaru Gaussovy křivky označováno TEM 00 (transversal electromagnetic mode of order 00). Je to ideální mód, rotačně symetrický podle svislé osy. Paprsek s tímto módem má nejmenší ztráty způsobené difrakcí, má minimální rozbíhavost, je možné jej maximálně zaostřit. Na svislé ose je největší intenzita uprostřed a k okrajům postupně klesá. Gaussovo rozložení intenzity laserového paprsku je zobrazeno na obrázku číslo 4 [24].

Symetričnost Gaussova módu způsobuje hlavní závislost výsledku řezání na směru řezu. TEM 00 může být zvláště vhodný pro laserové řezání kovů o menších tloušťkách. Tvoří se symetrický řez a úzká řezná spára. Centrum intenzity leží uprostřed. Typ TEM záleží na typu aplikace, na použití a také na druhu laseru. Pevnolátkové lasery mají TEM 00. CO₂ lasery mají módovou strukturu nazývanou top head. Příčný průřez intenzity záření je ve tvaru obdélníku. Top head nemá vrchol intenzity. Mód je rotačně symetrický podle svislé osy. Oproti Gaussovu módu má menší schopnost zaostření. Vzniká tedy širší řezná spára. Tento mód je vhodný pro laserové dělení kovů o větších tloušťkách materiálu. Pro některé aplikace může být výhodnější i jiné TEM než základní Gaussovo rozložení nebo top head. Módových struktur je celá řada, příklad jiného TEM je znázorněn na obrázku číslo 5 [24].

2 DĚLENÍ LASERŮ [14], [17], [20], [22], [34]

Lasery se dělí podle mnoha kritérií. Lze je dělit podle:

- typu buzení
- vyzařované vlnové délky
- režimu
- aktivního prostředí

Buzení může být elektrické v podobě srážek v elektrickém výboji, svazkem nabitých částic, injektáží elektronů, interakcí elektromagnetického pole se shluky nabitých částic. Dále může být buzení optické. Optické buzení je ve formě výbojky nebo jiného laseru, například laserové diody. Budit lze i slunečním světlem a radioaktivním zářením. Buzení může být i chemické. Energie pro buzení elektronů je získána z chemické vazby, fotochemickou disociací, výměnou energie mezi molekulami, atomy nebo exotermickou reakcí. Jako exotermická reakce se používá reakce vodíku s chlorem nebo fluorem. Také lze získat energii štěpením molekul jódu ozařováním ultrafialovým zářením. Další typ buzení může být termodynamický. Pracuje na principu zahřátí a ochlazení plynu. Budit elektrony v aktivním prostředí lze i jadernou energií vzniklou v jaderném reaktoru. Pro přehled laserů využívaných pro průmyslové aplikace jsou uvedeny vlastnosti některých často používaných laserů, které mají diodové buzení v tabulce číslo 1 [22].

Lasery lze také dělit podle vyzařované vlnové délky elektromagnetického záření. Podle tohoto kritéria lze dělit lasery na infračervené lasery, které vyzařují elektromagnetické záření v rozsahu vlnových délek od 780 nm do 1 mm. Potom jsou lasery vyzařující záření ve viditelné oblasti světla, tomu odpovídá rozsah vlnových od 360 nm do 780 nm. Dále jsou ultrafialové lasery v rozsahu vlnových délek od 10 nm do 360 nm. Poslední jsou rentgenové lasery od 0,01 nm do 10 nm.

V neposlední řadě lze lasery dělit podle režimu, ve kterém mohou pracovat. Podle toho je lze dělit na pulsní, impulsní a kontinuální. Některé lasery mohou pracovat jak v pulsním režimu, tak i v kontinuálním. Lasery pracující v pulsním režimu vysílají v krátkých pulsech vysokou frekvencí laserový svazek. Pulsních režimů je celá řada, liší se délkou pulsů a frekvencí pulsů. Řádově se délka jednoho pulsu pohybuje v jednotkách nanosekund a pikosekund. Frekvence se pohybuje v kHz. Impulsní lasery vysílají vysoce energetické pulsy, ale oproti pulsním laserům je opakovací frekvence mnohem menší. V kontinuálním režimu je laserový svazek vyzařován nepřetržitě a spojitě. Lasery pracující kontinuálně se označují jako CW (Continuous Wave) lasery.

Nejběžnější je rozdělení podle aktivního prostředí. Aktivní prostředí má vliv i na druh použitého buzení. Buzení musí být vhodné pro dané aktivní prostředí. Aktivní prostředí má hlavně vliv na samotnou konstrukci laseru a vlastnosti laserového záření, vlnovou délku a výkon. Dle aktivního prostředí dělíme lasery na:

- plynové,
- pevnolátkové
- polovodičové
- kapalínové.

Tab. č. 1 Porovnání vybraných vlastností diodou čerpaných laserů [22]

	Nd: YAG laser	CO ₂ laser	diskový laser	vláknový laser
celková účinnost	5%	10%	30%	30%
výstupní výkon	do 6 kW	do 20 kW	do 16 kW	do 50kW
životnost diod	10 000 hod.	-	10 000 hod.	100 000 hod.
chlazení	voda	voda	voda	voda/vzduch

2.1 Plynové lasery [14], [18], [22]

Je to velká skupina laserů, u těchto laserů může být aktivní prostředí tvořeno atomy, ionty nebo molekulami plynů. Plynové lasery jsou schopny pracovat v pulzním i kontinuálním režimu. Jsou schopny generovat záření v širokém spektru vlnových délek.

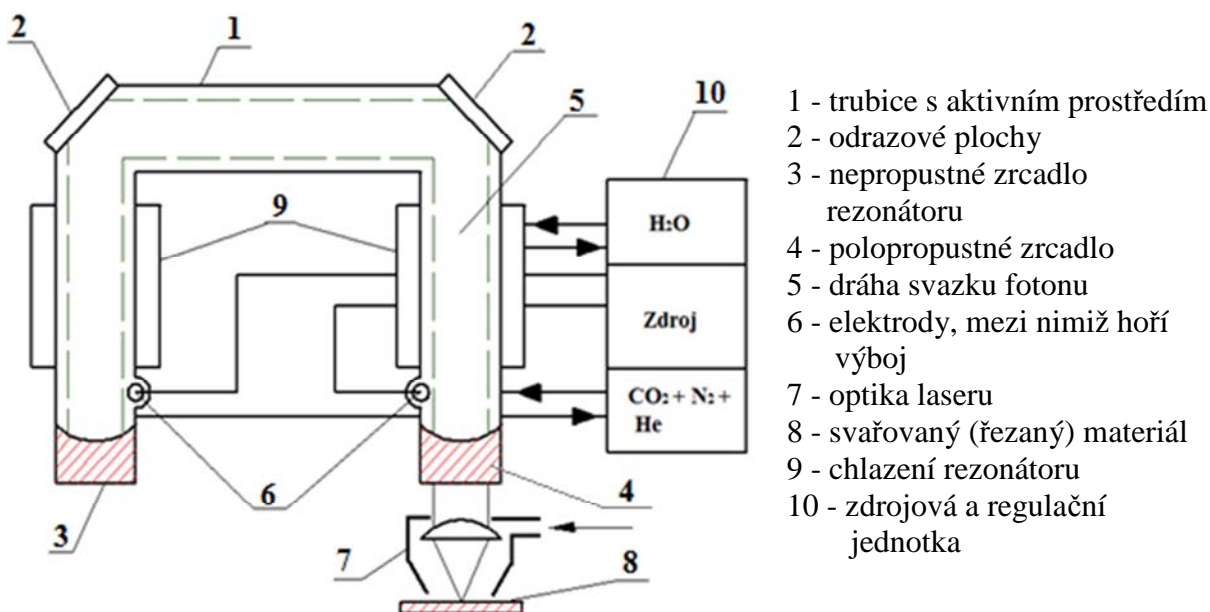
Typické buzení u plynových laserů je elektrickým výbojem v plynu, podobně jako se to děje u zářivky. U těchto laserů jsou kladeny vysoké nároky na čistotu aktivního prostředí (plynu). Tato čistota aktivního prostředí zajišťuje výborné vlastnosti laseru. U buzení elektrickým výbojem se dá regulovat výkon, a to množstvím plynu nebo jeho cirkulací. Nejznámější představitelé plynových laserů jsou helium - neonové, argonové, kryptonové, dusíkové lasery a CO₂ lasery.

2.1.1 CO₂ lasery [14], [18], [22]

CO₂ lasery jsou hojně využívány v technické praxi, protože jsou schopny generovat vysoké výkony. Běžně se výkony CO₂ laserů pohybují od 1 W do 20 kW. Účinnost laserů je kolem 10 - 20 %. U těchto laserů se používá speciální optika, nelze použít křemíkové sklo. Laserový paprsek je veden do místa řezu přes optickou soustavu, kterou tvoří zrcadla, clony a čočky. Tento typ laserů generuje infračervené záření několika vlnových délek, nejčastěji 9,4 μm a 10,6 μm. Častější je však vlnová délka 10,6 μm. Aktivní prostředí u těchto laserů je směs plynů tvořena oxidem uhličitým CO₂ = 10 - 20%, dusíkem N₂ = 10 - 20%, vodíkem, xenonem nebo heliem. Procentuální poměr může být různý. Tyto plyny jsou uzavřeny ve skleněné trubici. Plyn v trubici může proudit v příčném směru nebo ve směru podélném. Směr proudění ovlivňuje způsob buzení.

Při proudění plynu podélným směrem je používáno buzení doutnavým výbojem v plynu. Na obrázku číslo 6 [22] je zobrazeno schéma CO₂ laseru s podélným prouděním plynu. Ve druhém případě, při příčném proudění je buzení realizováno vysokofrekvenčním výbojem. Při vysokofrekvenčním výboji je dosahováno větších výkonů. Výkony těchto laserů se pohybují od 0,5 do 20 kW. Maximální hodnoty ve výkonech však činní až 200 kW.

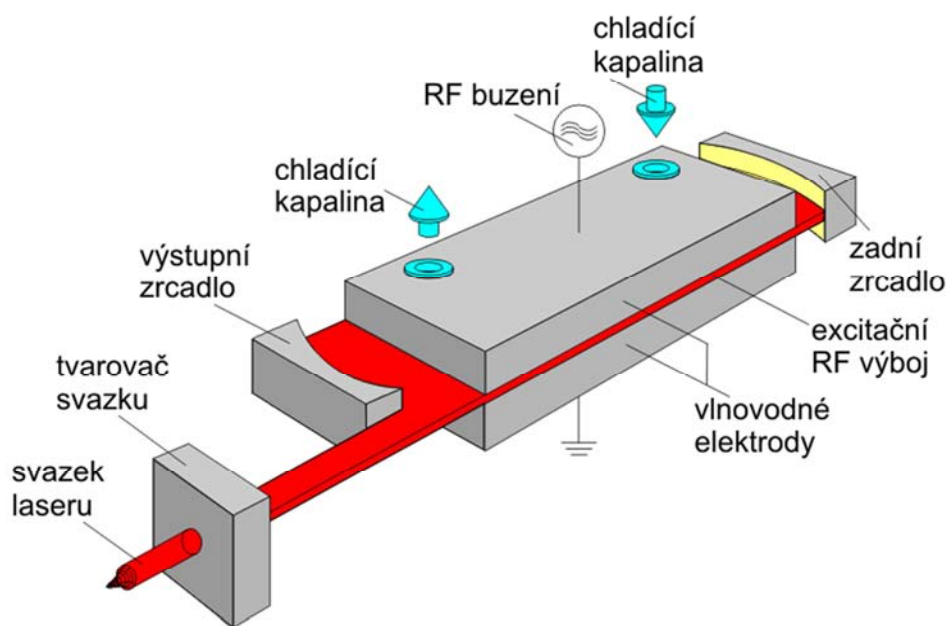
Laser musí být také chlazen, u klasické konstrukce tohoto typu je chlazení provedeno na základě nuceného oběhu aktivního plynu přes chladič.



Obr. č. 6 Plynový laser s podélným prouděním [22]

Moderní CO₂ lasery jsou chlazeny difúzním způsobem. Tyto lasery se nazývají SLAB CO₂ lasery. U těchto laserů teplo přechází do deskových měděných elektrod, samotné elektrody jsou chlazený vodou. U tohoto způsobu není potřeba nucené cirkulace plynu. Výkony se pohybují v rozmezí od 0,5 do 2,5 kW.

Difúzní CO₂ laser má mnoho výhod, jako je minimum pohybových částí, nemá tepelný chladič, má vysokou tepelnou stabilitu a nízkou spotřebu plynu. Plyn neproudí, a tedy nekontaminuje optiku, má malé provozní náklady a rozměry. Schéma SLAB CO₂ laseru je znázorněno na obrázku číslo 7 [14].



Obr. č. 7 SLAB CO₂ laser [14]

2.2 Pevnolátkové lasery [14], [15], [20], [21], [22], [29]

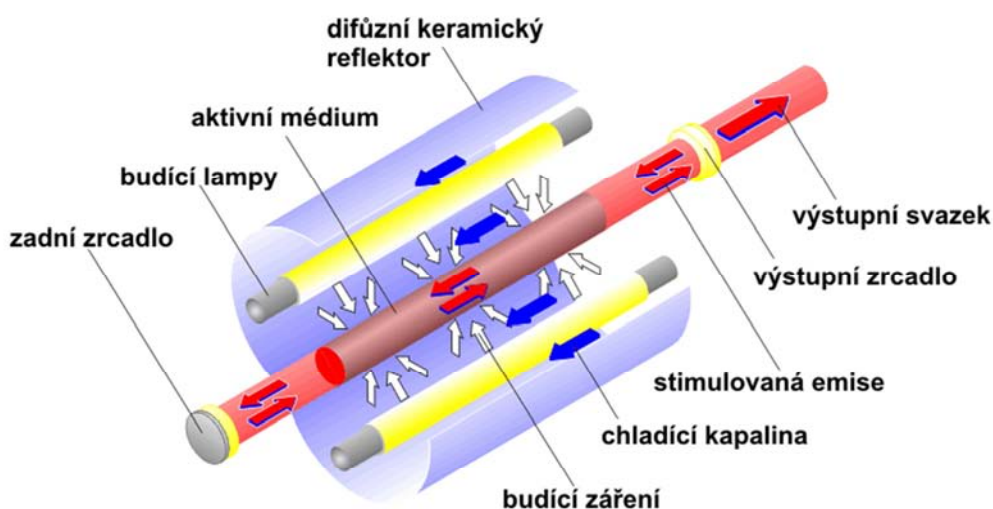
Pevnolátkové lasery využívají aktivní prostředí založené na pevné fázi: monokrystaly, krystalické nebo amorfni látky s příměsí vhodných iontů. Buzení (excitace) je obvykle optické. Do optického buzení řadíme výbojky nebo laserové diody. U pevnolátkových laserů lze dosahovat maximálních výkonů, které se pohybují v rozsahu W až desítek kW. Tyto lasery mohou pracovat v pulzním i v kontinuálním režimu. Mají malé nároky na údržbu. Jejich záření má vlnové délky v oboru infračerveného a viditelného světla. Laserový paprsek se dá vést v optických vláknech, což je velká výhoda, tato aplikace se používá pro robotizaci. Nejrozšířenější laser používaný v průmyslu je (neodymový) Nd: YAG laser, používá se v různých podobách, jako jsou diskové a vláknové lasery.

2.2.1 Nd: YAG laser [14], [29]

Je to pevnolátkový laser, aktivní prostředí je tvořeno krystalem vybroušeného do válcového tvaru. Jedná se o izotopní krystal Yttrium Aluminium Granátu Y₃Al₅O₁₂ dopovaný ionty neodymu Nd³⁺. Vlnová délka záření Nd: YAG laseru je 1,06 μm. Na úkor účinnosti může emitovat záření o vlnových délkách 0,94 μm; 0,14 μm; 0,11 μm a 0,13 μm. Záření je buzeno xenonovou nebo kryptonovou výbojkou. Účinnost se pohybuje kolem 5 %. V poslední době používají jako buzení diody GaAs o vlnové délce 808 nm, právě tato délka odpovídá absorpčnímu pásu prostředí pevného krystalu. Tímto typem buzení se zvyšuje účinnost a snižují se ztráty v buzení.

Při buzení diodami je účinnost okolo 30%, což je velmi dobrá účinnost. Výkony u laserů se pohybují kolem 5 kW. Buzení pomocí diod umožňuje pulsní i kontinuální režim.

Během chodu laseru se krystal značně ohřívá, proto je chlazen. Problém nastává při chlazení krystalu. Vzniká již zmíněný thermal leasing effect. Povrch je chlazen intenzivněji než střed, a tím dochází k deformaci krystalu. To má za následek zhoršení kvality laserového záření. Lze to odstranit upravením geometrie krystalu. Pro rovnoměrnější chlazení je možné krystal zploštit, potom vzniká diskový laser, nebo natáhnout, potom vzniká vláknový laser. Na obrázku číslo 8 [29] je zobrazeno schéma Nd: YAG laseru.



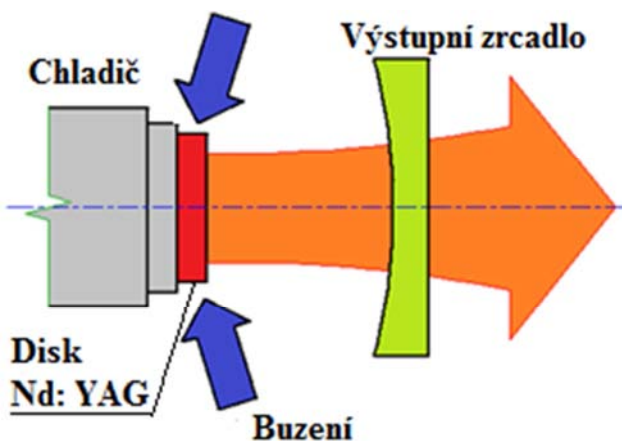
Obr. č. 8 Schéma Nd: YAG laseru [29]

Oba tyto typy laserů jsou modernější, více používanější a mají lepší účinnost než samotný Nd:YAG laser. Lasery diskové a vláknové mohou být typu Nd: YAG nebo Yb: YAG záleží na prvku, kterým je dopováno aktivním prostředí v laseru – Nd (neodym), Yb (Ytterbium).

2.2.2 Diskové lasery [14], [15]

Jsou to pevnolátkové, hojně využívané lasery v technologické praxi. Tyto lasery zamezují deformaci krystalu, takzvanému thermal leasing effect. U deskových laserů tvoří krystal ve tvaru desky aktivní prostředí, tím poskytuje rovnoměrnější chlazení. Tento typ laserů je vhodnější pro čerpání diodami. Buzení probíhá příčně horní a dolní stěnou nebo bočními stěnami.

Diskové lasery mají aktivní prostředí ve tvaru válce o výšce několika desetín milimetrů, z čehož plyne název diskové lasery. Disk má průměr asi 10 mm. Tato konstrukce odstraňuje deformaci krystalu při jeho chlazení. Laserový svazek má TEM 00, tedy Gaussovo rozložení intenzity. Buzení diodami zvyšuje výkon a účinnost. Má i menší optickou aparaturu a rezonátor. Disk tvoří aktivní prostředí a zároveň zadní plně odrazové zrcadlo. Na obrázku číslo 9 [15] je zobrazeno schéma diskového laseru.



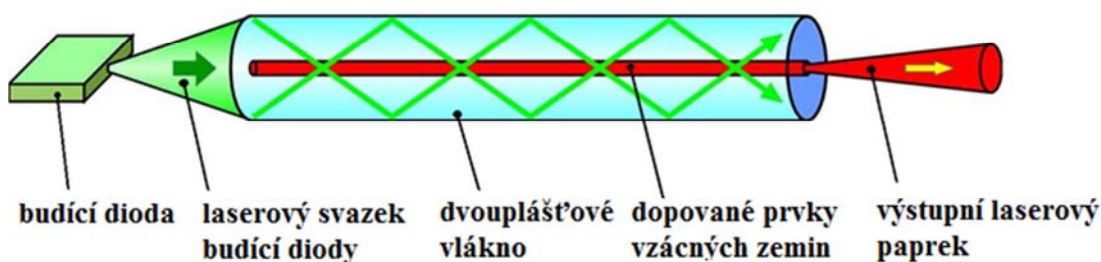
Obr. č. 9 Schéma diskového laseru [15]

2.2.3 Vláknové lasery [15], [34]

Další typ pevnolátkových laserů; jsou vláknové lasery. Aktivní prostředí tvoří křemíkové vlákno. Vláknem je velice tenké. Průměry vláken se pohybují v řádech několika mikrometrů a délka vlákna je několik metrů. Křemík, ze kterého je vlákno tvořeno, je dopovaný ionty erbiu (Er). Další používaný prvek je ytterbium (Yb) nebo thulium (Tm). Dle prvku, který je přidán do křemíkového vlákna, vyzařuje vláknový laser různé vlnové délky. Pro prvek Er jsou to vlnové délky v rozmezí od 1540 nm do 1620 nm, pro prvek Yb to jsou délky od 1060 nm do 1120 nm. Pro Tm to jsou vlnové délky od 1720 nm do 2000 nm. Prvek je většinou umístěn v jádře křemíkového vlákna. Buzení je zajištěno laserovými diodami. Účinnost buzení je velmi vysoká a činí 70 - 80 %. Díky této účinnosti nedochází k takovému zahřívání aktivního prostředí. Většinou se chladí vzduchem nebo vodou. Paprsek budících diod je zaostřen na plášť laserového vlákna. Ten má vysokou odrazivost a postupně se odráží a šíří vláknem, přičemž dochází v jádře ke stimulované emisi fotonů. Laserové záření potom vystupuje na konci vlákna. Takto může být poskládáno několik vláken vedle sebe, tím se zvyšuje výkon zařízení. Na výstupu jsou jednotlivé svazky upraveny a zaostřeny optickou soustavou, která není nijak složitá. Hlavní výhodou je vedení laserového svazku přímo ve vlákně.

Tyto typy laseru jsou vhodné pro aplikace, jako jsou například tvarové řezání nebo svařování pomocí robotů. Využívají se i pro aplikace v průmyslu, mezi které patří přesné vrtání, řezání, gravírování a bodové svařování.

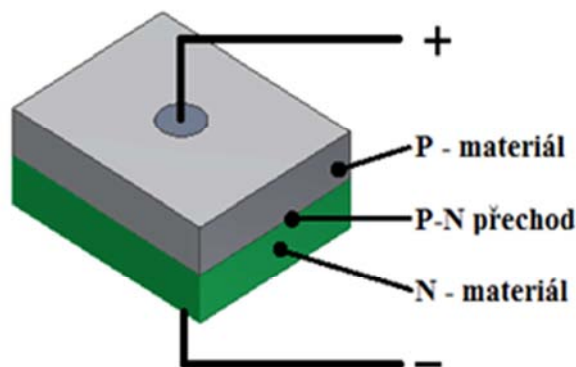
Výkony vláknových laserů se pohybují okolo 500W z jednoho vlákna maximálně. Kombinací více vláken se dá dosahovat hodnot v kilowatech. Na obrázku číslo 10 [15] je zobrazeno schéma vláknového laseru.



Obr. č. 10 Schéma vláknového laseru [15]

2.3 Polovodičové lasery [14], [22], [33]

Tyto lasery pracují v pulsním i kontinuálním režimu. Aktivní prostředí tvoří polovodičový P-N přechod, jež je zobrazen na obrázku číslo 11 [14]. Polovodičový krystal s P-N přechodem je opracovaný do tvaru hranolu. Stěny jsou kolmé na tento přechod. Buzení probíhá průchodem elektrického proudu. Proudem se dá snadno regulovat výkon. Pokud proud poklesne pod hodnotu takzvaného prahového proudu, dochází v diodě ke změně. Stimulovaná emise záření přestává probíhat a místo ní probíhá pouze spontánní emise.



Obr. č. 11 P-N přechod [14]

Pokud neprobíhá stimulovaná emise záření, znamená to zásadní zlom ve funkci a výkonu diody. Při spontánní emisi přestává být záření koherentní. Hodnota prahového proudu je závislá na teplotě a také na napětí. Pro různé diody jsou hodnoty různé. V oblasti P-N přechodu je generováno záření ve viditelné oblasti blízké červené barvě. Vlnová délka je dána koncentrací legujících prvků v krystalu polovodiče. V rovině přechodu se záření zesiluje opakovanými odrazy. Výkony se pohybují v mW.

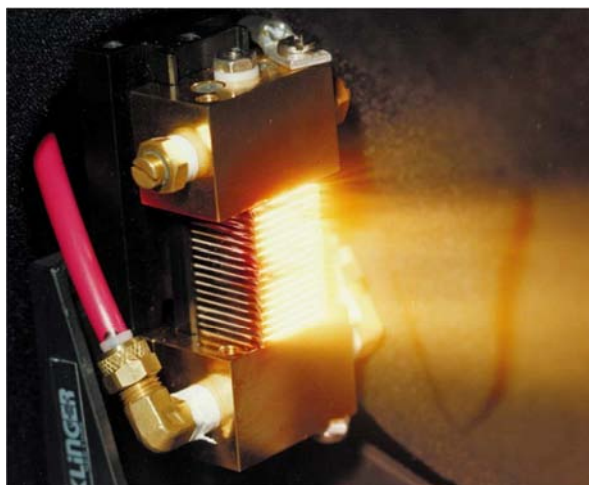
Nejpoužívanější diodový laser je GaAs laser s vlnovou délkou 808 nm. Další často používané jsou například GaN, PbSnSe, AlGaInP, InAsSb. Tyto jmenované diodové lasery jsou v dnešní době ve velké míře používány pro buzení jiných laserů.

Diodové lasery mají malé rozměry, proto se paprsek více rozbíhá ve srovnání s ostatními lasery. Kvalita paprsku je nižší. Diodové lasery se tedy používají tam, kde není požadován úzký svazek s centrálním maximem intenzity, například popisování obrobků, výroba polovodičů.

Moderní diodové lasery se nazývají stack lasery. Jedná se o soubor laserových diod. Pokud je potřeba, jsou přes poměrně složitou optickou soustavu ostřeny do jednoho místa. Tyto lasery se především používají u povrchových úprav materiálu, protože se oproti jiným typům laserů jejich paprsek více rozbíhá.

Lze dosáhnout výkonu diodového laserů několik kW. Na obrázku číslo 12 [33] je znázorněn diodový stack laser.

Diodové lasery mají své nezastupitelné místo pro použití v technické praxi. Jsou malé, lehké, účinné. Tyto lasery se dají snadno upevnit na robotické manipulátory, takže odpadá soustava, která by měla za úkol vést paprsek na místo určení. Níže je uvedena tabulka číslo 2 [14], kde jsou pro vybrané laserové diody uvedeny jejich vlnové délky, výkony a nejčastější použití.



Obr. č. 12 Stack laser [33]

Tab. č. 2 Vlnové délky a výkony vybraných laserových diod [14]

laser	vlnová délka	výkon	typické použití
GaAs	808 nm	5 mW	CD přehrávače, buzení pevnolátkových laserů
AlGaAs	760 nm	50 mW	laserové tiskárny
GalnAsP	1300 nm	20 mW	komunikace pomocí optického vlákna

2.4 Kapalínové lasery [14], [22]

Aktivní prostředí u těchto laserů je tvořeno z roztoků různých organických barviv, například rhodaminu. Nevýhodou je, že působením světla a tepla se barvivo postupem času rozkládá. Pomocí různých kombinací několika druhů barev lze vytvořit laserové záření o všech vlnových délkách v rozsahu od 300 nm do 1500 nm. Vlnové délky lze plynule měnit i za chodu a ladit. Pracují v pulsním i kontinuálním režimu. Využití má hlavně ve výzkumu ve fotochemii a fotofyzice, v laboratořích a spektroskopii. Spektroskopie je fyzikální obor zabývající se vznikem a vlastnostmi spekter při interakci s prostředím.

3 POUŽITÍ LASERŮ [25], [28], [32], [35], [36], [37], [41]

Lasery mají široký rozsah použití v nejrůznějších oborech. Značné uplatnění pro laser je v medicíně, při různých operacích je laser využíván jako laserový nůž nebo jako zubařská vrtačka. Další využití je v elektronice a elektrotechnice pro výrobu polovodičových čipů a jejich miniaturizaci a pájení. V komunikačních technologiích je laserový parsek používán pro přenos informací v optickém vláknu.

V měřicí technice je laser využíván pro kalibraci měrek, kalibraci snímačů délky, polohování sondy mikroskopu nebo měření indexu lomu pro různé plynné prostředí. Měřit se dají i vzdálenosti a rozměry i velmi malých objektů. Lze měřit i rychlosti, například rychlostní radar na pozemních komunikacích.

V astronomii, v letectví a kosmonautice je například využíván laserový gyroskop nebo je laserový paprsek použit pro navádění. Ve výzkumu se laserový paprsek používá pro optickou manipulaci s mikročásticemi.

Pomocí laserové spektroskopie můžeme zjistit chemické složení látek. Paprskem laseru je vyvolán kvantový přechod ve zkoumané látce, na základě spontánní emise je vyzářené charakteristické spektrum elektromagnetického záření, jehož rozбором můžeme zjistit chemické složení látky. Měření lze provádět na velké vzdálenosti. Můžeme zjistit chemické složení hvězd nebo provádět měření v nebezpečných nebo nedostupných oblastech. Lze zjistit i znečištění ovzduší.

Největší využití mají v průmyslu a v technické praxi. Lasery jsou používány pro obrábění materiálu, vrtání, řezání materiálu, svařování a pájení. Pomocí laserů lze provádět různé povrchové úpravy, například kalit a legovat. Lze jím provádět i žárové nástřiky a napařovat povrchové vrstvy.

3.1 Vrtání laserem [22], [25], [32], [36]

Vrtání laserem představuje bezkontaktní způsob vrtání. Je to velmi přesný a produktivní způsob vrtání s minimálním tepelným ovlivněním materiálu.

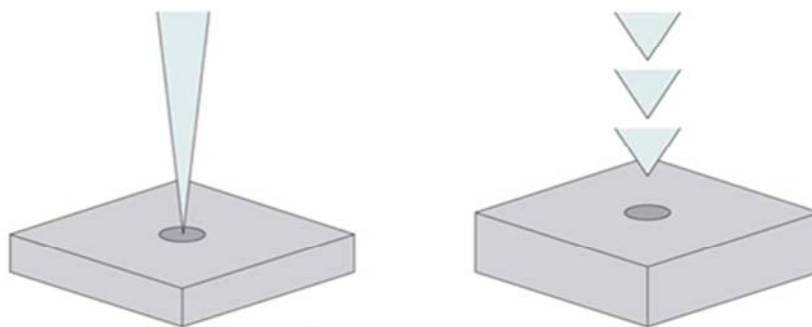
Pro vrtání laserem se používá pulzních laserů. Při vrtání tvoří pulsy vysokou hustotu energie dodávanou v krátkém čase do materiálu. Vrtání probíhá tak, že se nepotřebný materiál za působení laserových pulsů taví a následně odpařuje z místa vrtu. Při odpařování vznikne vysoký tlak par materiálu ve vrtaném otvoru. Tyto páry vypuzují taveninu z místa vrtání. Další možnost vrtání je odstranění přebytečného materiálu vyříznutím kruhového otvoru. Největší využití má laser při výrobě malých otvorů na místech, kde by byly klasickými způsoby jen těžko vyrobitelné. Například díra sklopená od povrchu pod úhlem 10°. Díry se dají vyrábět od průměru 100 μm a do hloubky padesátkrát větší než je jejich průměr. Dobře se vrtá i do velmi tvrdých materiálů, se kterými mají konvenční technologie problémy.

Pro vrtání laserem se používá pulzních laserů s délkou pulsu menší než 1 ms. Existují různé režimy vrtání, u těchto režimů se délka pulsů liší. Liší se i délka prodlevy a intenzita energie, která je soustředěna v pulzu.

Vrtání lze rozdělit na tři metody, podle postupu při vrtání:

- vrtání jednotlivými pulsy a nárazové vrtání
- sublimační
- trepanační

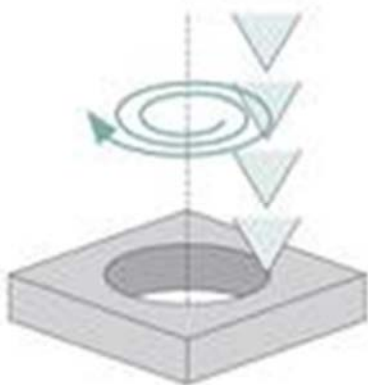
Vrtání jednotlivými impulsy a nárazové vrtání se využívá pro velmi malé otvory. V nejjednodušším případě vytvoří otvor jediný impuls laseru. Průměr otvoru je tvořen průměrem paprsku laseru. Při nárazovém vrtání vzniká otvor více impulsy laseru s nižším trváním a menší energií impulsu. Tato metoda vrtání vytváří hlubší, menší a přesnější otvory než vrtání jednotlivými impulsy. Na obrázku číslo 13 [32] je vpravo znázorněno vrtání otvoru na jeden impuls a vlevo vrtání nárazové - vrtání na více impulzů.



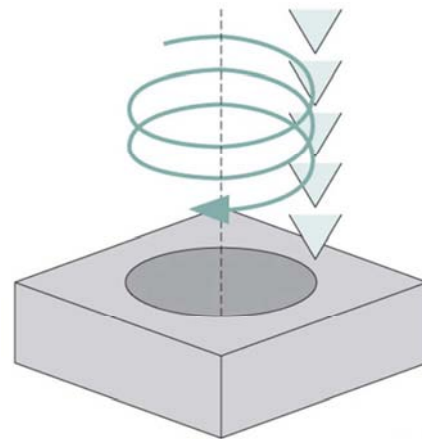
Obr. č. 13 Vrtání na jeden impuls; Vrtání nárazové [32]

Vrtání metodou trepanace vzniká otvor několika impulsy laseru. Laser nejprve vyvrtá počáteční otvor pomocí nárazového vrtání, poté zvětší počáteční otvor tím, že jezdí nad obrobkem v několika zvětšujících se kruhových drahách. Největší část roztaveného materiálu je přitom vypuzována z otvoru směrem dolů. Princip trepanačního vrtání je znázorněn na obrázku číslo 14 [32]. Trepanační vrtání se používá pro větší otvory než vrtání jednotlivými pulsy a pro tenčí materiály než například spirálové vrtání.

Metoda spirálového vrtání na rozdíl od trepanace při vrtání nevytváří žádný počáteční otvor. Laser jezdí nad materiálem již při prvních impulsch v kruhové dráze. Tím vystupuje velké množství materiálu směrem nahoru. Laser se propracovává do hloubky ve tvaru točitého schodiště. Jestliže laser pronikne materiálem, lze ještě přidat několik kruhů. Ty slouží k rozšíření spodní strany otvoru a začištění okrajů. Spirálovým vrtáním lze vytvářet velmi velké a hluboké otvory o vysoké kvalitě. Schéma spirálového vrtání je znázorněno na obrázku číslo 15 [32].



Obr. č. 14 Trepanační vrtání [32]



Obr. č. 15 Spirálové vrtání [32]

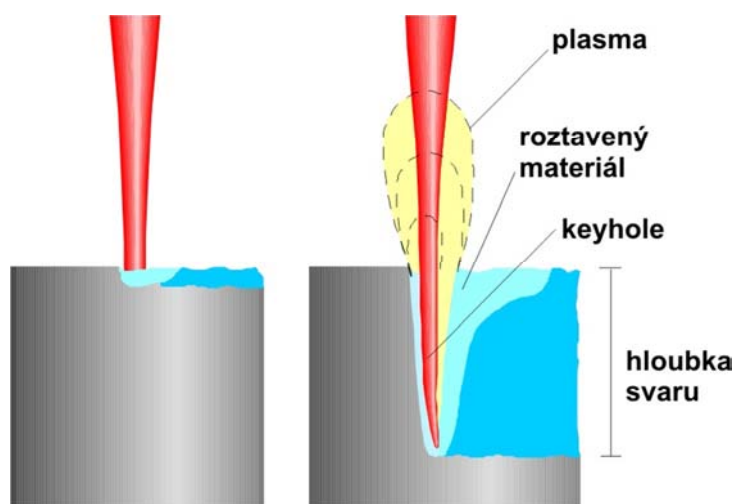
3.2 Svařování laserovým paprskem [3], [18], [32], [37]

Laser je často používán pro svařování materiálů a to bez ohledu na jejich chemické složení. Dají se svařovat i těžko svařitelné materiály s vysokou teplotou tavení (wolfram, molybden, tantal, zinek, titan, nikl), s velkou tepelnou vodivostí (měď, hliník), vysokolegované oceli anebo nesourodé materiály. Nesourodými materiály mohou být například litina a nízkolegovaná ocel.

Laserové svařování představuje vysoce produktivní technologii vyznačující se vysokou kvalitou svaru. Při svařování vzniká úzký hluboký závar, malá tepelně ovlivněná oblast a malé deformace svařovaných součástí.

Lze svařovat i magnetické materiály s velkou hloubkou průvaru, protože laserový paprsek není ovlivňován magnetickým polem. Pomocí laseru se také dobře svařují i velmi tenké plechy. Při svařování tenkých plechů pracuje laser v pulsním režimu, s délkou pulsu 1 ms. Takto se spojují plechy o tloušťkách řádově μm . Svařování laserem se dá snadno regulovat a automatizovat. Používané výkony pro svařování, které převedeme na plochu, se pohybují v rozsahu od 10^4 až 10^8 Wcm^{-2} . Svařování je často prováděno pod ochrannou atmosférou nebo je zkombinováno s metodou MIG/MAG.

Hluboký průvar je docílen při svařování vznikem takzvané keyhole. Keyhole je spára, která je vyplněna parami kovů. Páry vznikají při svařování v materiálu. Páry jsou následně působením laserového paprsku ionizovány a vzniká z nich plasma. Ve spáře se zvyšuje tlak plasmy a par kovů. Plasma a páry se derou na povrch. Tím je zamezeno slití roztaveného kovu a svarová spára - kapilára zůstává průchozí. Aby se laserový paprsek dostal do hloubky a nebyl pohlcen plasmou, která pohlcuje velkou část laserového záření, musí být plasma z kapiláry odfukována



Obr. č. 16 Proces svařování laserem [37]

ochranným plynem argonem, heliem nebo směsí argonu a oxidu uhličitého. Nejlepší je pro tento účel helium. Po té se může šířit touto spárou laserový paprsek hlouběji do materiálu. Tento proces je zobrazen na obrázku číslo 16 [37].

Takto otevřená kapilára vzniká pod místem, kde působí laserový paprsek. Jestliže se paprsek pohybuje, kapilára se pohybuje s ním. Pro vytvoření hlubokého svaru jsou potřeba velké výkony laserů. Tvorba plasmy se dá ovlivnit nastavením řezných parametrů. Hustota energie paprsku musí být vhodně nastavena, aby se materiál neodpařoval dříve, než se prohřeje do oblasti tavení v podpovrchové vrstvě.

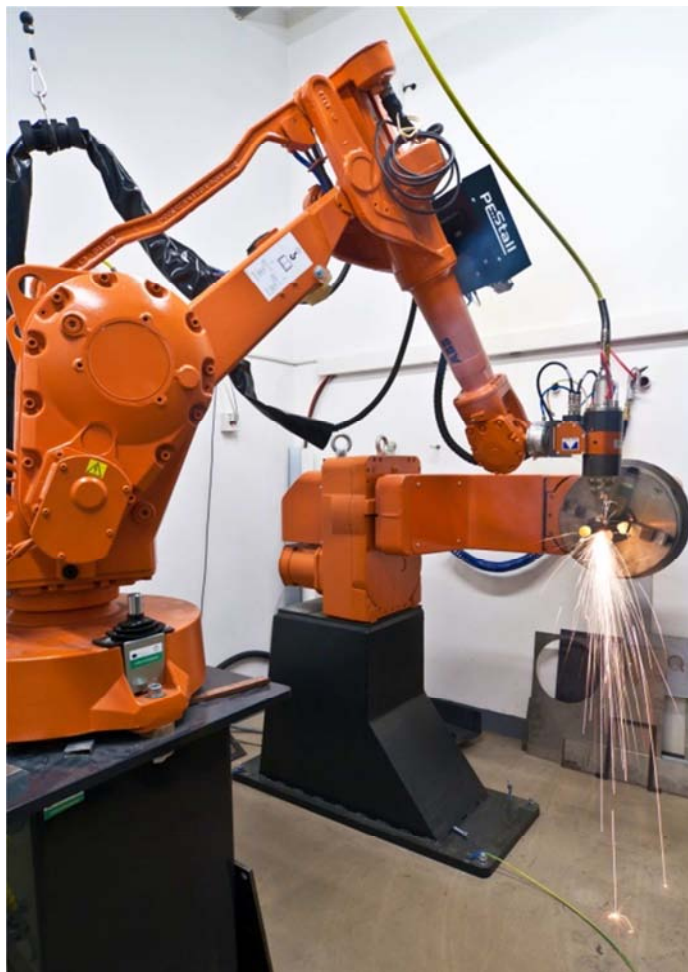
Svařitelnost materiálu je podobná jako u metody WIG. Do svaru je vneseno malé množství tepla a rychlost ochlazování svaru je velká. Aby nevznikaly křehké struktury, nesmí obsah uhlíku u svařovaných ocelových materiálů překročit 2 %.

4 ŘEZÁNÍ LASEREM [3], [16], [18], [21], [32], [37], [38]

Řezání laserem je metoda tepelného dělení materiálu. energii potřebnou pro řezání získáváme ze zaostřeného laserového paprsku, ten je přeměňován na teplo při interakci s materiálem. Proces je podporován proudem plynu. Jedná se o bezkontaktní způsob řezání.

Laserem lze dělit snad všechny druhy materiálů, jako je například uhlíková ocel, legovaná ocel, litina, barevné kovy, různé kovové slitiny, dřevo a plasty.

Je to rychlá a produktivní metoda řezání. Řezné rychlosti se pohybují v desítkách metrů za sekundu. Snadno se automatizuje a reguluje výkon. Lze řezat v rámci plochy a také lze provádět i prostorové řezy. Dají se řezat i velké tloušťky materiálu řádově v desítkách milimetrů, záleží na způsobu řezání. Na obrázku číslo 17 [38] je vyfocen robot s řeznou hlavou, který provádí prostorový řez. Tímto robotem a řeznou hlavou byly řezány i měřené vzorky.



Obr. č. 17 Prostorové řezání [38]

Při laserovém způsobu dělení materiálu dochází k malému tepelnému ovlivnění v okolí řezné spáry díky minimálnímu množství vneseného tepla. Dochází k přesnému řezu. Dosahovaná přesnost se pohybuje od 0,05 mm do 0,1 mm. Dosahovaná drsnost se pohybuje kolem Ra 1,6 μm . Průměr zaostřeného paprsku na povrchu řezaného materiálu se pohybuje přibližně 0,05 mm. Při řezání je nutno soustředit velikou hustotu výkonu na co nejmenší dopadovou plochu.

Řezat laserem lze více způsoby, používá se:

- sublimační řezání
- tavné řezání
- oxidační řezání

Při řezání a obecně při opracovávání obrobku laserem záleží na jeho materiálu. Různé materiály jsou více či méně vhodné pro opracovávání laserem. Vlastnosti, které určují vhodnost materiálu být dělen laserovým dělením, jsou optické a termofyzikální.

Schopnost absorpce materiálu patří mezi jednu z hlavních určujících vlastností. Je to schopnost povrchu absorbovat světelné záření dopadající na povrch a měnit ho na tepelnou energii. Při interakci světelného paprsku s materiálem působí záření přímo na krystalickou mřížku materiálu a zvyšuje její frekvenci kmitání, tak se zvyšuje teplota materiálu. Všechno záření není absorbováno a přeměněno na teplo, část záření se od materiálu odrazí a rozptýlí se pryč do prostoru a malá část záření projde skrz materiál.

Absorpce je závislá na obráběném materiálu a také na samotném záření, které na povrch tělesa dopadá, největší vliv má vlnová délka světelného paprsku. Lepší absorpce se dosahuje zářením o kratší vlnové délce, v tomto ohledu mají lepší výsledky pevnolátkové lasery oproti plynovým. Na schopnost absorpce má velký vliv teplota materiálu. S rostoucí teplotou stoupá schopnost absorpce materiálu. V příloze číslo 1 [3] je uveden graf, kde je dána schopnost absorpce vybraných materiálů v závislosti na teplotě. Tento graf je zpracován při použití CO₂ laseru pro leštění povrchů vybraných materiálů. Absorpce je také ovlivňována ději, které vznikají při řezném procesu, jako jsou páry kovů a plasma. Ty odstiňují laserové záření a zabraňují absorpci.

Hloubka průniku záření laseru do materiálu závisí na výkonu laserového zdroje, frekvenci a tepelné vodivosti materiálu. Obecně platí, že materiál je lépe obrobitelný laserem tím víc, čím má větší schopnost absorpce a menší tepelnou vodivost. Pokud má malou tepelnou vodivost, teplo se nestačí rozptýlovat v materiálu a zůstává v místě řezu. Proto je vneseno do místa řezu a celkově do materiálu méně tepla a materiál se lépe řeže. V tabulce číslo 3 [16] jsou uvedeny součinitele absorpce pro některé vybrané materiály a některé vlnové délky. Hodnoty součinitelů platí pro teplotu 20 °C. V příloze číslo 1 [3] je znázorněna závislost absorpce na vlnové délce pro jednotlivé materiály. Při řezání se však materiál zahřívá, a to ve velmi krátkém časovém úseku. S rostoucí teplotou roste schopnost absorpce spolu s elektrickým odporem. Součinitel absorpce se tedy v průběhu procesu řezu mění. Dále v příloze číslo 2 [3] jsou zobrazeny tabulky, první tabulka udává vliv vlnové délky záření na velikost absorpce leštěného povrchu podobně jako tabulka číslo 3 [16]. Druhá tabulka v této příloze zobrazuje vliv stavu povrchu na koeficient absorpce. Pokud bychom chtěli zjistit součinitele odrazivosti, je možné jej zjistit ze součinitele absorpce. Součet součinitele absorpce pro daný materiál a danou vlnovou délku se součinitelem odrazivosti dává dohromady hodnotu rovno jedné, vztah 4.1:

$$R = 1 - A \quad [-] \quad (4.1)$$

Kde:

A - součinitel absorpce [-]

R - součinitel odrazivosti [-]

Tab. č. 3 Součinitele absorpce některých kovů [16]

Materiál	Vlnová délka λ [μm]		
	0,7	1,06	10,6
Hliník	0,13	0,07	0,03
Chrom	0,44	0,42	0,07
Měď	0,18	0,09	0,02
Nikl	0,32	0,25	0,05
Stříbro	0,05	0,03	0,01
Ocel	0,42	0,37	0,07

Sublimační řezání probíhá tak, že materiál je odstraňován převážně odpařováním. V důsledku vysoké intenzity záření laseru. V místě řezu materiál sublimuje přímo z pevného skupenství na plynné skupenství. Pára z materiálu vytváří ve štěrbině řezu vysoký tlak a vypuzuje taveninu pryč z místa řezu směrem nahoru i dolů. Tavenina vzniká, i přestože snahou a principem procesu je sublimace materiálu. Laser pracuje v pulzním režimu. V intervalu mezi pulsy mohou páry roztaveného kovu uniknout ze spáry. Pro lepší odvod par se používá vyfukování par kovů ze spáry inertním plynem. Spára vzniká postupně během procesu sublimace materiálu. Při řezání má inertní plyn přiváděný do místa řezu i funkci ochrannou.

Inertní plyn vytváří ochranou atmosféru, zabraňuje tím korozi řezných hran a zvyšuje jakost řezu. Má však i zápornou vlastnost, ochlazuje místo řezu. Ochlazování způsobuje větší ztráty, menší účinnost řezání a je potřeba většího dodávaného výkonu.

Jako inertní plyny jsou používány argon, dusík, helium. Sublimační řezání se používá při jemném řezání menších nebo složitých součástí. Typické materiály pro tuto technologii řezání jsou fólie z plastické hmoty a textilie.

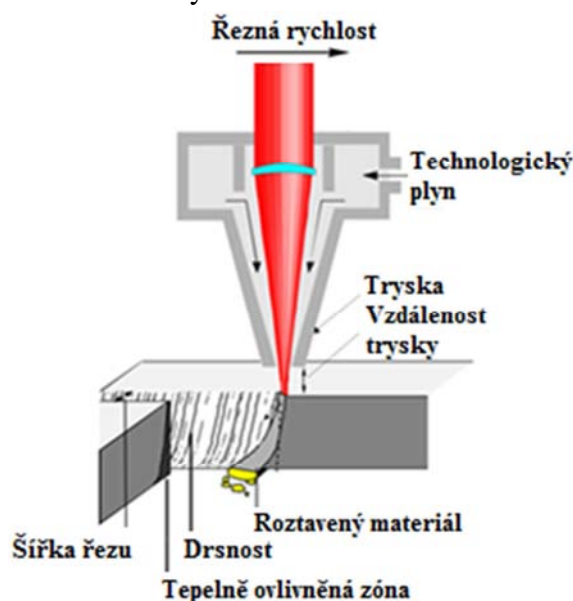
Tyto materiály mají nízkou teplotu vypařování. Dále se používají materiály, které se nemohou tavit, například dřevo, lepenka, pěna. Obecný princip řezání laserem je znázorněn na obrázku číslo 18 [21].

Při **Tavném řezání** je materiál v místě řezu laserovým paprskem roztaven. Vzniká lázeň roztaveného kovu. Tekutý kov je asistenčním inertním plynem odfukován směrem dolů a tím vzniká řezná spára. Tlak pomocného inertního plynu musí být dostatečně veliký 10 až 20 barů, z důvodu velkého povrchového napětí taveniny a ulpívání taveniny na spodní straně řezu. Jako inertní plyn se používá argon nebo dusík. Spotřeba plynu je poměrně vysoká. Při řezání je ohnisko laserového paprsku zaostřeno na spodní plochu řezaného plechu, to je znázorněno na obrázku číslo 19 [26].

Tímto způsobem jsou řezány všechny tavitelné materiály, jako jsou keramika, sklo, plasty, plexisklo, legované a nelegované oceli (nerez oceli), litiny, neželezné kovy a jejich slitiny, hlavně měď a hliník. Oproti sublimačnímu řezání lze dosahovat vyšších řezných rychlostí. Řezná hrana je neoxidovaná díky inertnímu plynu.

Oxidační řezání se používá se pro dělení kovů hlavně uhlíkových ocelí s nízkým obsahem uhlíku, titanu a korozivzdorné ocele. Podobně jako u řezání kyslíkovým plamenem, řezaný materiál má zápalnou teplotu nižší, než je teplota tavení kovu. Paprsek laseru ohřeje materiál na zápalnou teplotu a poté může s přiváděným reaktivním plynem (kyslíkem) shořet v exotermické reakci. Tlak reaktivního plynu je ve srovnání s tavným způsobem menší, pohybuje se kolem 3 - 5 barů.

Při exotermické reakci vzniká další tepelná energie. Energie je rovna až pětinašobku energie, kterou nese laserový paprsek.



Obr. č. 18 Řezání laserem [21]



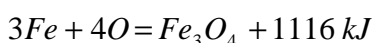
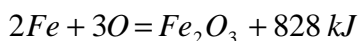
Obr. č. 19 Ohnisko - tavné řezání [26]



Obr. č. 20 Ohnisko - oxidační řezání [26]

Energie je využívána pro přehřev okolí řezu a ohřev vzniklé taveniny a oxidů. Dále vzniká struska, ta je z místa řezu odstraňována asistenčním plynem. Ohnisko paprsku je zaostřeno těsně pod povrch řezaného materiálu, to znázorňuje obrázek číslo 20 [26].

Exotermická reakce probíhá u ocelových materiálů za teploty kolem 1100 °C, na tuto teplotu je materiál ohřát laserem za velmi krátkou dobu. Při proudění kyslíku dochází ke spalování řezaného kovu. Při řezání čistého železa je zápalná teplota 1155 °C. Čím více je uhlíku v oceli, tím klesá zápalná teplota. Exotermická reakce při spalování oceli je popsána vzorci níže:



Při spalování železa vzniká 25 - 34 % FeO, 15 % Fe₂O₃, 35 - 45 % Fe₃O₄ a asi 15 % nepáleného kovu. Pokud shoří 1 kg železa, uvolní se asi 5040 kJ tepla.

Je to velmi rychlý způsob řezání s menšími nároky na energii díky exotermické reakci, je rychlejší než sublimační řezání. Je to metoda vhodná pro řezání velkých tloušťek materiálu, například ocel lze řezat v tloušťkách více než 30 mm.

Je to nejrychlejší způsob laserového řezání, ale na úkor kvality řezné hrany. Při používání kyslíku dochází k zoxidování řezné hrany. Tento způsob řezání je vhodný zejména pro nelegovanou a středně legovanou ocel. U nelegované oceli tvoří hladkou řeznou hranu pokrytou tenkou vrstvou oxidů. Nevhodné je použití pro dělení legovaných a vysokolegovaných ocelí, kde se tvoří silně zoxidovaná řezná hrana s oxidy chromu, které jsou velmi tvrdé a obtížně odstranitelné oproti oxidům železa. Ty jsou měkké a snadno odstranitelné.

5 KVALITA ŘEZU A ŘEZNÉ PARAMETRY

[1], [7], [9], [27], [40]

Při laserovém dělení je důležité vhodné nastavení řezných parametrů. Na nastavení řezných parametrů závisí jakost a přesnost řezu.

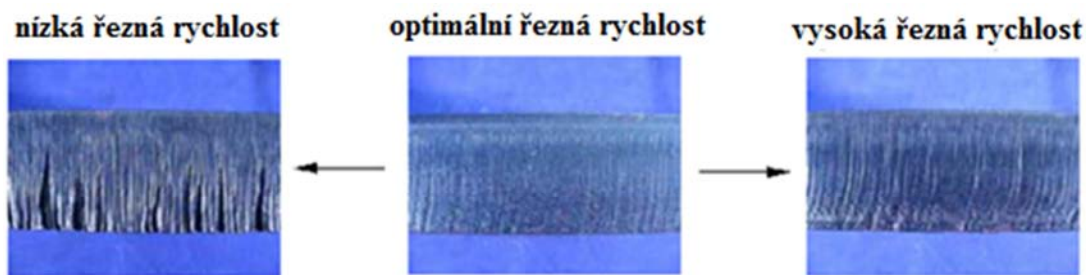
Řezné parametry se volí s ohledem na řezaný materiál a jeho vlastnosti:

- druh materiálu a jeho chemické složení
- viskozita taveniny
- tepelná vodivost
- schopnost absorpce
- tloušťka materiálu

Řezné parametry se také nastavují v závislosti na metodě řezání. Mezi hlavní řezné parametry patří:

- řezná rychlost
- výkon laserového paprsku
- vlnová délka
- režim laseru
- frekvence
- duty (střída frekvence)
- poloha ohniska laserového paprsku
- druh řezného plynu
- tlak řezného plynu
- vzdálenost trysky nad materiálem
- parametry ovlivňující ostrý roh

Řezná rychlost je jedním z hlavních řezných parametrů. Udává se většinou v metrech za minutu. Pokud bude řezná rychlost malá ke zvolené intenzitě, bude řez spálen a budou vznikat vypálená místa na řezné hraně. Pokud bude rychlost vysoká, materiál se neprořízne nebo budou vznikat otřepty. Rychlost závisí také na druhu řezu. Pokud bude prováděn rovný řez, bude rychlost vyšší. V případě kdy budou prováděny tvarově složité detailní řezy, bude rychlost nižší. Rychlost musíme přizpůsobit i tloušťce materiálu. Se stoupající tloušťkou řezaného materiálu klesá rychlost řezání a zvyšuje se výkon řezného paprsku. Na obrázku číslo 21 [1] jsou zobrazeny řezy při nastavení příliš nízké rychlosti, optimální rychlosti a příliš vysoké rychlosti.



Obr. č. 21 Řezy při různých řezných rychlostech [1]

Výkon laserového paprsku je další řezný parametr. Ten se uvádí ve wattech, u výkonnějších laserů se uvádí v kW. Dá se také uvádět v procentech maximálního výkonu laseru. Množství tepla vneseného do řezu se určuje vztahem

$$Q = \frac{P}{v} \cdot \eta \quad [J] \quad (5.1)$$

Kde:

Q - množství tepla [J]

P - výkon laserového paprsku [W]

v - rychlost řezání [m/s]

η - součinitel účinnosti [-]

Pokud je množství vneseného tepla velké, dochází k hrubnutí řezu. Na obrázku číslo 22 [1] jsou zobrazeny vzorky řezány při příliš nízkém výkonu, při optimálním výkonu a při příliš vysokém výkonu.



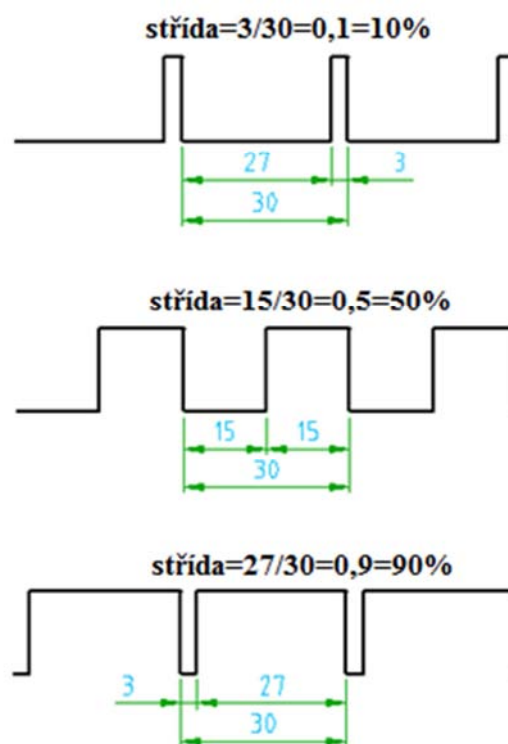
Obr. č. 22 Řezy při různých řezných výkonech laserového paprsku [1]

Vlnová délka má velký vliv na schopnost absorpce. Záření o kratších vlnových délkách má lepší schopnost absorpce. Kratší vlnové délky vyzařují pevnolátkové lasery. Oproti plynovým laserům vyzařují záření o vlnových délkách přibližně desetkrát menších. U některých typů laserů lze vlnové délky v určitém rozsahu měnit, ale většinou na úkor výkonu laseru.

Další určující parametr kvality řezu je **režim**, ve kterém laser pracuje. Pokud pracuje v CW režimu, je hlavní parametr výkon laseru. Pokud laser pracuje v pulsním režimu nebo impulsním režimu, je důležitý parametr opakovací frekvence. Frekvence určuje množství pulsů za jednotku času a tedy i množství vneseného výkonu.

S volbou řezacího režimu souvisí i parametr **duty (střída frekvence)**. Na obrázku číslo 23 [26] je pro názornost náčrt pro vysvětlení pojmu střída frekvence.

Střída je poměr mezi stavem, kdy je laserový paprsek vysílán ze zdroje a mezi celkovou dobou chodu. Tento parametr se uvádí v poměru psaný zlomkem nebo v procentech, přičemž procentuální vyjádření udává hodnotu, kdy laser vysílá laserové záření z celkové doby chodu.



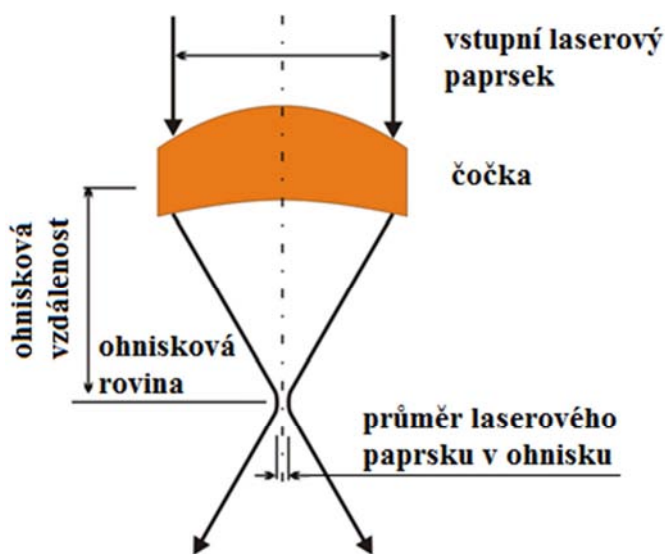
Obr. č. 23 Střída frekvence [26]

Další parametr je **poloha ohniska** laserového paprsku vzhledem k materiálu. Nastavovaná hodnota je většinou vzdálenost, o kterou se poloha ohniska liší od základního nastavení. Základní nastavení je nastaveno výrobcem a zjišťuje se postupem daným výrobcem nebo automaticky pomocí speciálního programu a pomocí interních optických čidel. Kontrola polohy ohniska je důležitá, protože při procesu řezání může dojít k degradaci čoček. Tyto čočky je nutno vyměnit, jednotlivé čočky mohou mít polohy ohniska odlišné. Každá čočka se tedy proměřuje zvlášť. Poloha ohniska také závisí na metodě řezání. Při různých způsobech řezání je poloha ohniska různě umístěná. Na obrázku číslo 24 [1] jsou zobrazeny řezy materiálu s nastavením ohniska příliš nízko, optimálně a příliš vysoko. Poloha ohniska také závisí na metodě řezání. Na obrázku 25 je znázorněna ohnisková vzdálenost laserového paprsku [27]



Obr. č. 24 Řezy s různými polohami ohniska [1]

Na kvalitu řezu má také vliv způsob řezání. Má vliv, zda se jedná o tavné, oxidační nebo sublimační řezání. S tím souvisí i použití **druhu plynu**, který je do místa řezu dodáván. Při použití kyslíku vzniká na povrchu tenká zoxidovaná vrstva. Při použití inertních plynů argonu, dusíku a helia nedochází k zoxidování řezné hrany. Plyn musí být vhodně zvolen v závislosti na materiálu, který chceme dělit. Například kyslík není vhodný pro titan a nesmí být použit pro hořlavé materiály. Důležitá je také čistota použitého plynu. U kyslíku se doporučuje čistota 99,95 %. Pro korozivzdorné oceli se při tavném řezání používá dusík. Zde jsou kladeny ještě větší nároky na čistotu plynu - 99,999 %. Pokud je horší kvalita, může docházet k tvorbě otřepů a hrubnutí řezu.



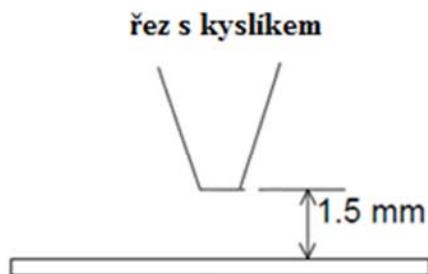
Obr. č. 25 Ohnisková vzdálenost [27]

Další parametr, který má velký vliv na kvalitu řezu je **tlak plynu**. Tlak se volí v závislosti na tloušťce děleného materiálu a na způsobu dělení. Při řezání kyslíkem se volí větší tlaky pro tenčí materiály a pro tlustší materiály se volí menší tlaky. U řezání inertními plyny je to s volbou tlaku naopak. Volí se vyšší tlak pro větší tloušťky a menší tlak pro menší tloušťky. Tlak se udává v MPa nebo v bar. Na obrázku číslo 26 [1] jsou zobrazeny řezy materiálu s nastavením příliš nízkého tlaku, optimálního tlaku a příliš vysokého tlaku.

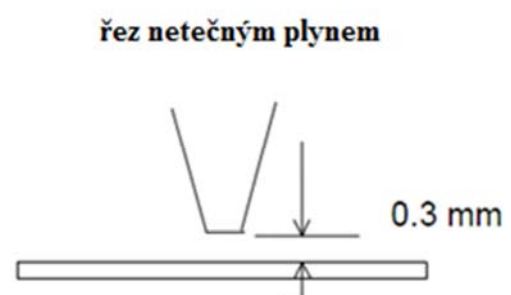


Obr. č. 26 Řez prováděný s různým nastavením tlaku plynu [1]

Vzdálenost trysky od materiálu přímo ovlivňuje polohu ohniska. Má vliv na množství plynu, které vstupuje do řezné spáry. vzdálenost mezi materiálem a tryskou musí být dostatečně velká, aby nedošlo ke kontaktu trysky s materiálem a následně k jejímu poškození. Čím blíže je tryska k materiálu, tím je větší riziko poškození čochy rozstříkem řezaného kovu. Větší vzdálenost je požadovaná u řezání kyslíkem asi 1,5 mm, obrázek číslo 27 [1]. Pro řez s netečnými plyny jsou vzdálenosti menší kolem 0,3 mm. To je znázorněno na obrázku číslo 28 [1].



Obr. č. 27 Vzdálenost trysky při řezání kyslíkem [1]



Obr. č. 28 Vzdálenost trysky při řezání plynem [1]

Na kvalitu a strukturu řezné hrany mají vliv také takzvané **parametry ovlivňující ostrý roh**. Při řezání tvarů může docházet při změně směru řezání ke koncentraci tepla v místech, kde se mění směr vektoru pohybu řezné trysky. Vnesené teplo se hromadí hlavně v rozích. Koncentrací tepla může docházet k nežádoucím jevům, jako je zhrubnutí struktury a řezu nebo natavení rohu. Tyto jevy se snažíme odstranit. Pro předcházení tohoto jevu se používá úpravy v řídicím programu, který řídí pohyb řezné trysky a řezné parametry. Řezné parametry jsou automaticky vhodně nastavovány řídicím systémem v závislosti na směru pohybu řezné trysky, například je snížen výkon laserového paprsku nebo frekvence, pokud laser pracuje v pulsním režimu. Tak je omezeno množství vneseného tepla. Dalším řešením je úprava trajektorie pohybu řezné trysky v rohu a to tak, že v rozích jsou vytvářeny smyčky.

5.1 Vady řezu [1], [26], [40]

Řez a jeho výsledná kvalita a struktura je dána nastavením řezných parametrů a podmínek při řezání. Do kvality řezu lze zařadit i vady řezu. Vady vznikají:

- nevhodným nastavením řezných parametrů,
- špatným nastavením prvků optické soustavy a jejich degradací při procesu řezání
- degradací laserového rezonátoru

Důležité řezné parametry byly zmíněny výše v kapitole 5. Špatné nastavení má většinou za následek vnesení většího množství tepla do místa řezu, než je potřeba k řezání. To vede k zhrubnutí řezu. Dále dochází k zužování řezné spáry, natavení vrchní řezné hrany nebo vznikají vruby na spodní hraně řezu.

Vady při procesu řezání také vznikají špatným seřízením prvků optické soustavy nebo jejich degradací. Pokud je špatně vycentrovaná tryska, laserový paprsek není umístěn uprostřed proudu plynu, který z ní vychází. Projevuje se to na kvalitě řezu, ta se mění v závislosti na směru řezání. Špatné seřízení prvků optické soustavy způsobuje špatné umístění ohniska. Ohnisko se může posouvat i při nadměrném zahřívání čočky, která se pak kroutí a mění tím svou geometrii. Při špatné poloze ohniska se začíná na řezné hraně objevovat proměnlivá kvalita řezu, na spodní straně řezu se mohou tvořit otřepy. Přehřívání čočky způsobují nečistoty, posléze při nedostatečném chlazení může dojít k její degradaci. Nepříznivě na čočku působí i tlak plynu. Právě plynem mohou být do soustavy vnášeny drobné nečistoty.

K degradaci rezonátoru dochází při nedostatečném chlazení, při jeho znečištění nebo narušení zrcadla. To má za následek přehřívání rezonátoru, prvky v rezonátoru jako jsou držáky zrcadel, se tepelně kroutí a odchylojí zrcadla od původní polohy. To způsobí změnu módu a posun ohniska. Vzniká opět zhoršení kvality řezu, jeho zhrubnutí, zvýšení drsnosti a tvoří se otřepy. Kvalita řezu při degradaci rezonátoru je závislá na nastaveném výkonu. Při větších výkonech se intenzivněji ohřívá rezonátor, a tak se více zhoršuje kvalita řezu.

Na vznik vad mají vliv také samotné vlastnosti materiálu. Některé materiály jsou více vhodné pro laserové dělení a některé jsou méně vhodné. Vady mohou být posuzovány pouhým okem nebo přístroji. Pouhým okem se posuzují otřepy a výmoly. Vady, které se posuzují měřicími přístroji, jsou šířka řezné mezery a kolmost.

Nesouměrná řezná spára je vada řezu, která vzniká při vniku laserového paprsku do materiálu a při jeho vystupování z materiálu. Řezná spára se s přibývajícím tloušťkou zužuje. Je to hlavně závislé na poloze ohniska, dále na materiálu, vlnové délce a postupu řezání. Záleží také na laseru, CO₂ lasery mají širší řeznou spáru jak YAG lasery. Pokud se vytváří širší řezná spára, může to být vhodnější. Do širší řezné spáry vniká lépe pracovní plyn a vzniká laminární proudění plynu. Naopak ve velmi úzké řezné spáře dochází k turbulencím a špatnému prostupu pracovního plynu.

Otřepy jsou nejvíce sledované. Patří mezi důležitá kritéria jakosti řezné hrany. Otřepy vznikají na spodní hraně řezu, při výstupu laserového paprsku z materiálu.

Druhy otřepů:

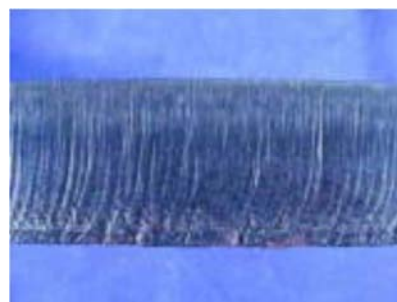
- slzovitý otřep
- struskovitý otřep
- ostrý otřep (špičatý)

Slzovitý otřep je nejhroší na odstraňování. Je tvořen kapkami roztaveného kovu, který ztuhl na spodní straně řezu.

Struskovitý otřep vzniká na povrchu v místě řezu při oxidačním řezání nebo pokud nemáme dostatečně čistý inertní plyn. Tvoří jemně struskovou drobenku. Lze dobře odstranit.

Ostrý otřep je nejčastější typ otřepu při tavném způsobu řezání. Tvoří ostrou jehlicovitou strukturu, která je přilepená na spodní straně řezu. Lze poměrně dobře odstranit.

Skluz vzniká při větších rychlostech řezání. Skluz je zobrazen na obrázku číslo 29 [1]. Jedná se o rýhy. Rýhy vznikají procesem řezání vždy, je to důsledek nerovnoměrného chladnutí materiálu. Tyto rýhy tvoří drsnost řezu. Skluz má za následek odchylování rýh proti směru pohybu řezání ke spodnímu okraji řezu. Při pomalejších rychlostech se skluz téměř nevyskytuje a rýhování, jež vzniká, je téměř rovnoběžné se směrem laserového paprsku.



Obr. č. 29 Skluz [1]

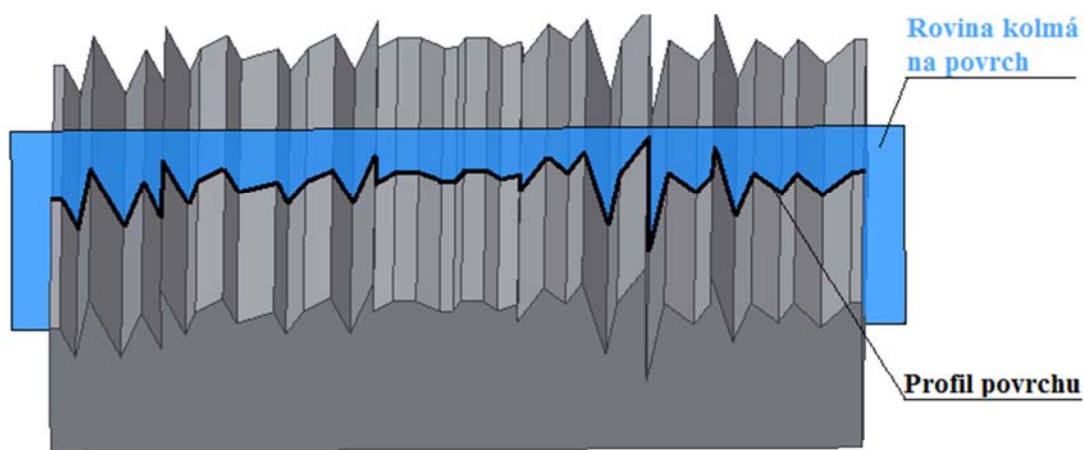
Pitting jsou označovány vady řezu jako je například eroze materiálu. Jedná se o vypálená místa nebo krátery. Vzniká na ploše řezu a narušuje jej. Pitting vzniká při změně směru řezání nebo z důvodu nekvalitního materiálu. V materiálu mohou být vady ve struktuře, ve formě vměstků, nečistot a okují, které jsou při válcování zaválcovány do materiálu.

6 KVALITA A DRSNOST POVRCHU [4], [7], [8], [31], [39]

Drsnost povrchu je jeden z parametrů pro hodnocení celkové jakosti povrchu. Hodnocení jakosti povrchu se hodnotí z pohledu technologie výroby, přesnosti rozměrů, přesnosti geometrického tvaru polohy a již zmíněná drsnost. S jakostí povrchu souvisí i změny, které vznikají při výrobním procesu. Při výrobním procesu mohou na povrchu součásti vzniknout změny. Může dojít k plastické deformaci povrchu a to vlivem mechanického a tepelného namáhání. Vlivem teploty může dojít k rekrystalizaci, a tím i ke změně struktury, jako je například zhrubnutí zrna. Mění se mikrotvrдость, vznikají mikro a makro trhliny a zbytková napětí v povrchové vrstvě.

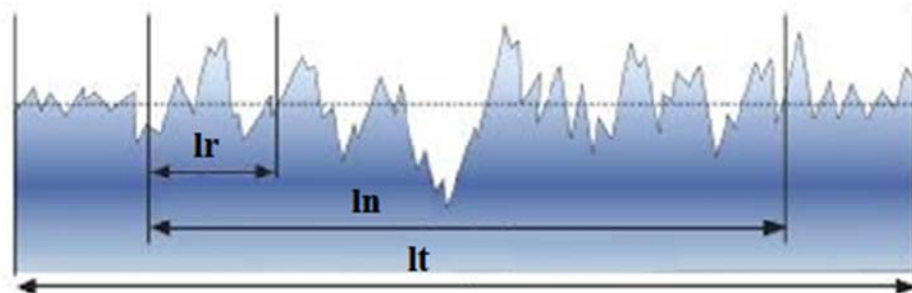
Při realizaci technických ploch vnikají na vytvářených plochách nerovnosti. Ty jsou výsledkem technologické metody, kterou je plocha vytvářena. Tyto nerovnosti tvoří drsnost plochy a mají zásadní vliv na funkčnost plochy v provozu. Plocha s danou drsností tvoří část součásti. Drsnost povrchu má vliv na funkčnost součásti, na její přesnost, životnost a spolehlivost, protože drsnost a struktura povrchu má velký vliv na únavovou pevnost a odolnost proti korozi. Drsnost má také vliv na hlučnost součásti při provozu a na dobu jejího záběhu ve strojním celku, pokud se plochy součásti vůči sobě pohybují. Dále ovlivňuje tepelnou vodivost, elektrickou vodivost, tření a s tím spojené ztráty.

Nerovnosti povrchu, které vznikají technologickým procesem při výrobě plochy, tvoří prostorové útvary. Ty lze jen těžko posuzovat a vyhodnocovat, proto je tento problém obvykle řešen redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. Průmět povrchu do této kolmé roviny vytvoří profil povrchu. To je znázorněno na obrázku číslo 30 [4]. Při měření drsnosti nezískáme skutečný profil povrchu, získáme jen přibližný profil, který se tomuto profilu přibližuje. Tento snímaný profil vzniká jako geometrické místo středů snímacího hrotu nebo prvku. Snímací prvek není nikdy dokonale ostrý tak, aby byl schopen zobrazit skutečný profil povrchu. Nejpoužívanější prvek je snímací hrot. Při měření se snímací hrot pohybuje po celkové délce l_t , ta se skládá z délky nájezdu a přejezdu snímacího hrotu a hlavně z vyhodnocované délky l_n . Jak už název napovídá, na této délce l_n dochází k samotnému vyhodnocení struktury měřeného povrchu.



Obr. č. 30 Redukce do roviny řezu rovinou kolmou na povrch [4]

Vyhodnocovaná délka l_n se skládá z ještě menších úseků, které se nazývají základní délky l_r . Základní délka je délka ve směru pohybu hrotu. Je to vzdálenost použitá pro rozpoznání nerovností, které charakterizují vyhodnocovaný profil. Jednotlivé délky jsou pro představu zobrazeny na obrázku číslo 31 [39].



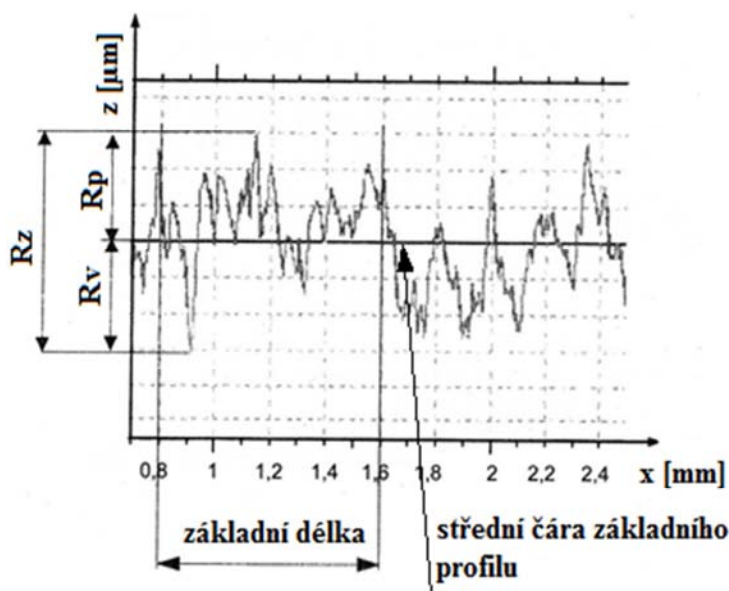
Obr. č. 31 Popis jednotlivých délek [39]

Struktura povrchu je možné popsat pomocí tří základních parametrů:

- P - profil, je to parametr vypočítaný ze základního profilu
- W - profil, je to parametr vypočítaný z profilu nerovností
- R - profil, je to parametr vypočítaný z profilu drsnosti

Pro drsnost je důležitý parametr R. Tento parametr může být charakterizován dalšími parametry, které popisují tvar snímaného profilu. Všechny zmíněné parametry R jsou uváděny a měřeny v mikrometrech - μm .

Mezi tyto parametry patří největší výška výstupků profilu drsnosti, ta je označovaná R_p . R_p je výška nejvyššího výstupku profilu drsnosti. Jako další parametr je největší hloubka prohlubně profilu drsnosti R_v . Tato hodnota udává hloubku největší prohlubně profilu. Tyto dva parametry jsou měřeny a kótovány od střední čáry základního profilu. To je znázorněno na obrázku číslo 32 [4]. Střední čára základního profilu je čára nejmenších čtverců pořadic odpovídající jmenovitému tvaru základního profilu. Z těchto dvou parametrů lze určit největší výšku profilu R_z

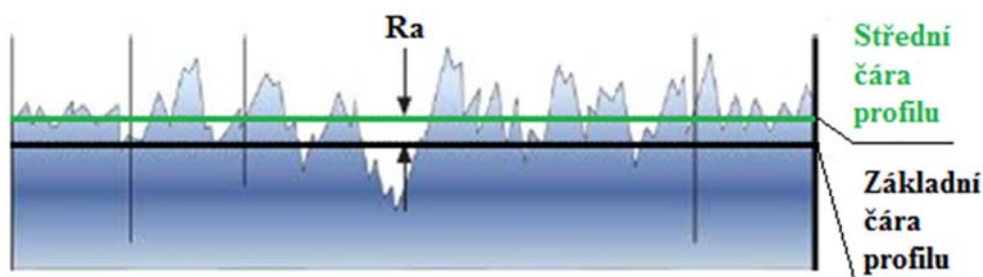


Obr. č. 32 Parametry R_p , R_v , R_z [4]

a to tak, že sečteme výšku největšího výstupku a hloubku největší prohlubně drsnosti povrchu v rozsahu základní délky. Podobně lze určit celkovou výšku profilu drsnosti označovanou R_t , je to opět součet výšky nejvyššího výstupku a nejhlubší prohlubně profilu drsnosti, ale na rozdíl od parametru R_z je R_t v rozsahu vyhodnocované délky.

Poslední důležitý parametr je průměrná aritmetická úchylka profilu označovaná R_a . Tento parametr udává průměrnou aritmetickou hodnotu výšek profilu drsnosti v rozsahu základní délky. Dnes je R_a velmi používaný parametr pro předepisování drsnosti povrchu na výkres. Udává aritmetický průměr všech odchylek od střední čáry profilu na vyhodnocované délce bez ohledu na jejich směr. To znamená, že se berou odchylky v absolutních hodnotách, tudíž nelze určit, zda se jedná spíše o charakter nerovnosti povrchu výstupků nebo prohlubní. Tato hodnota není výrazně ovlivňována ojedinělými odchylkami. Podává přesnější obraz o povrchu.

Má však nevýhodu, může se při tomto způsobu vyhodnocování stát, že je zanedbán velký výstupek nebo rýha. Různé struktury povrchu se mohou jevit velmi odlišně, a přitom vykazují stejnou hodnotu R_a . Na obrázku číslo 33 [39] je zakótován parametr R_a k základní čáře profilu povrchu.



Obr. č. 33 Znázornění hodnoty R_a [39]

Metod pro posuzování drsnosti a kvality povrchu je celá řada. Můžeme je rozlišovat na kvalitativní a kvantitativní, dvourozměrné nebo třírozměrné metody.

Kvalitativní metoda je metoda porovnávací, zkoumaný povrch je porovnáván s povrchem, jehož drsnost známe. Srovnávané povrchy musí být obrobena stejnými způsoby. Porovnává se zrakem nebo hmatem, popřípadě jsou vzorky porovnány pod mikroskopem.

Kvantitativní metody jsou metody, jež určují hodnotu drsnosti číselně v parametrech R_a , R_z , a dalších výše popsanych. Pro toto měření se používá několik druhů zařízení a měřících přístrojů. Obecně je můžeme rozdělit do skupin:

- měřicí přístroje dotykové
- měřicí přístroje bezdotykové
- ostatní měřicí přístroje

U měřících přístrojů dotykových se posouvá měřicí hrot po povrchu a kopíruje jej. Z toho se potom vypočítávají potřebné hodnoty. Dotykové přístroje se hlavně používají u dvourozměrných metod. Metody používají metodu redukce do roviny kolmé na povrch.

Měřicí přístroje bezdotykové jsou většinou založeny na optickém principu. Paprsek světla je vyslán na povrch. Vlivem nerovností se po povrchu rozptýlí, část se ho absorbuje a část odrazí. Odražený světelný paprsek se zpětně snímá a vyhodnocuje. Toto měření není ovlivňováno vadami povrchu, jako jsou díry a výrůstky. Bezdotykové měřicí přístroje se používají pro třírozměrnou metodu hodnocení textury povrchu. Tyto metody nepoužívají metodu redukce do roviny kolmé na povrch. Jedná se o kvalitativně vyšší úroveň komplexního posuzování vlastností povrchu. Tyto metody jsou technicky náročnější jak z pohledu snímání dat, tak z pohledu vyhodnocování a zpracování. Naopak však přináší komplexnější a pravdivější obraz o povrchu.

6.1 Měření drsnosti povrchu a parametrů textury povrchu [4], [8]

Pro zjišťování hodnot parametrů drsnosti povrchu existuje řada metod. Nejrozšířenější je snímání povrchu dotykovou metodou. Tato metoda je založená na snímání povrchu pomocí ostrého hrotu. Hrot se posouvá po povrchu a snímá tak nerovnosti povrchu. Tak lze vyhodnocovat povrchové parametry drsnosti povrchu.

Měření je prováděno nejčastěji dotykovým profilometrem. Ten je složen z mechanické části a z elektronické části. Mechanická část se skládá z měřicího ramene, na kterém je na konci umístěn snímací hrot.

Hrot je vyroben z tvrdého materiálu, aby byl co nejvíce odolný proti otěru a udržel si stálou geometrii. Může být vyroben z umělého diamantu, z kubického nitridu bóru nebo ze slinutého karbidu. Snímací rameno je pohyblivě upevněné v profilometru. Pohyb je umožněn ve směru kolmém na střední čáru základního profilu, aby mohl hrot kopírovat strukturu povrchu. Dále se hrot i se snímacím ramenem pohybuje po základní délce ve směru dovnitř nebo ven od elektronické části. Parametry měření jako je základní délka a další délky zmíněné výše se dají nastavovat. Záleží na samotném měřicím přístroji a jeho možnostech.

Mechanický signál, který je generován z mechanické části profilometru, je převáděn v elektronické části přístroje na elektrický signál pomocí různých snímačů. Většinou se jedná o indukční snímače. Tento získaný signál je dále zpracováván a vyhodnocován. Získané hodnoty jsou interpretovány na displeji přístroje. Popřípadě může přístroj zobrazit snímaný profil jako průmět do kolmé roviny na rovinu řezu. Opět záleží na samotném přístroji.

Na snímaný profil, který získáme ze samotného měření, má vliv mnoho parametrů a výsledný snímaný profil se vždy liší od skutečného základního profilu. Vliv na zobrazování a snímání profilu má především poloměr zaoblení snímacího hrotu, vrcholový úhel snímacího hrotu, měřicí přítlačná síla a rychlost měřicí síly.

Pro samotné měření je důležité zvolit vhodné podmínky, aby se výsledky měření daly považovat za správné a objektivní. Je potřeba zvolit vhodně základní délku pro zachycení dostatku nerovností charakterizující drsnost celého povrchu. Nastavená hodnota snímané délky by měla zahrnovat pětinasobek základní délky. K tomuto pětinasobku je nutno přičíst délku náběhů a přeběhů. Měřený objekt by měl být pevně upnut nebo položen na pevné podložce. Jen tak bude dostatečně stabilní pro měření. V tabulce číslo 4 [4] jsou uvedeny příklady volby základní délky pro měření Ra.

Tab. č. 4 Příklady volby délek pro měření Ra [4]

Ra [μm]	Základní délka drsnosti l_r [mm]	Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n [mm]
$(0,006 < Ra \leq 0,02)$	0,08	0,4
$(0,02 < Ra \leq 0,1)$	0,25	1,25
$(0,1 < Ra \leq 2)$	0,8	4
$(2 < Ra \leq 10)$	2,5	12,5
$(10 < Ra \leq 80)$	8	40

Pokud provádíme měření, musíme mít k dispozici odpovídající měřicí přístroj, jehož měřicí rozsah musí být přiměřený k měřenému profilu. Pak se provádí předběžný odhad měřené drsnosti a podle tabulky je zadána vyhodnocovaná délka.

Před měřením musí být nastaveny odpovídající pracovní podmínky:

- pracovní rozsah,
- snímaná délka,
- základní délka

Musí být také kalibrován snímač, například pomocí vhodných etalonů. Následně musí být vhodně orientován na snímaném povrchu. Tím je nastavená výchozí poloha.

Měření se provádí na té části povrchu, kde lze předpokládat kritické výsledky. To může být posouzeno a vyhodnoceno pouze vizuálně.

6.2 Norma ČSN EN ISO 9013 [6], [31]

Jedná se o mezinárodní normu. Používá se pro materiály vhodné pro řezání kyslíkovým plamenem, plasmové řezání a řezání laserem. Platí pro řezy plamenem od 3 mm do 300 mm, řezy plasmou od 1 mm do 150 mm a řezy laserem od 0,5 mm do 40 mm. Tato norma zahrnuje geometrické požadavky na výrobky a úchyly jakosti řezu, dále stanovuje pravidla pro popsání jakosti tepelných řezů nezávisle na metodě dělení, zda šlo o dělení kyslíkovým plamenem, plasmové nebo laserové řezání.

Jsou zde definovány podmínky pro měření. Měření se provádí na kartáčovaných řezech očištěné od oxidů a mimo oblasti, kde se nacházejí vady. Měřicí místa musí být umístěna tam, kde se dá očekávat největší naměřená drsnost. Počet měřicích míst závisí na tvaru součásti, tato hodnota je udávána výrobcem. Pokud nejsou stanoveny žádné požadavky, musí být provedena dvakrát tři měření ve vzdálenosti 20 mm na každý metr řezu pro měření kolmosti řezu nebo skonu řezu označováno v normě písmenem u. Pro měření tloušťek řezu menších jak 2 mm musí být předem dohodnutý postup měření.

Důležitější jsou pravidla pro měření struktury povrchu Rz5. Rz5 je průměrná výška profilu - průměrná hodnota z Rz. Měření je prováděno dotykovým přístrojem. Jedná se o měřidlo pro přesné měření s mezní hodnotou chyby 0,002 mm. Měřidlo může být elektrický dotykový hrotový přístroj pro souvislé snímání ve směru řezání.

Při měření struktury povrchu norma vyhodnocuje parametr Rz5, je to charakteristická hodnota průměrné výšky prvků profilu. Toto měření se provádí dle normy v horní třetině od horní hrany řezu, pokud byl řez proveden laserem. Pro řezání kyslíkem nebo plasmou se měří ve vzdálenosti 2/3 od horní strany řezu. Pro tloušťky řezu menší jak 2 mm se měří v 1/2 tloušťky řezu od horní hrany řezu.

Při hodnocení jakosti řezu dle normy ČSN EN ISO 9013 Rz5 musí být měřena na úseku 15 mm délky řezu ve směru posuvu hořáku.

Jakost a kvalita povrchu řezu je definovaná v normě sledováním charakteristických parametrů:

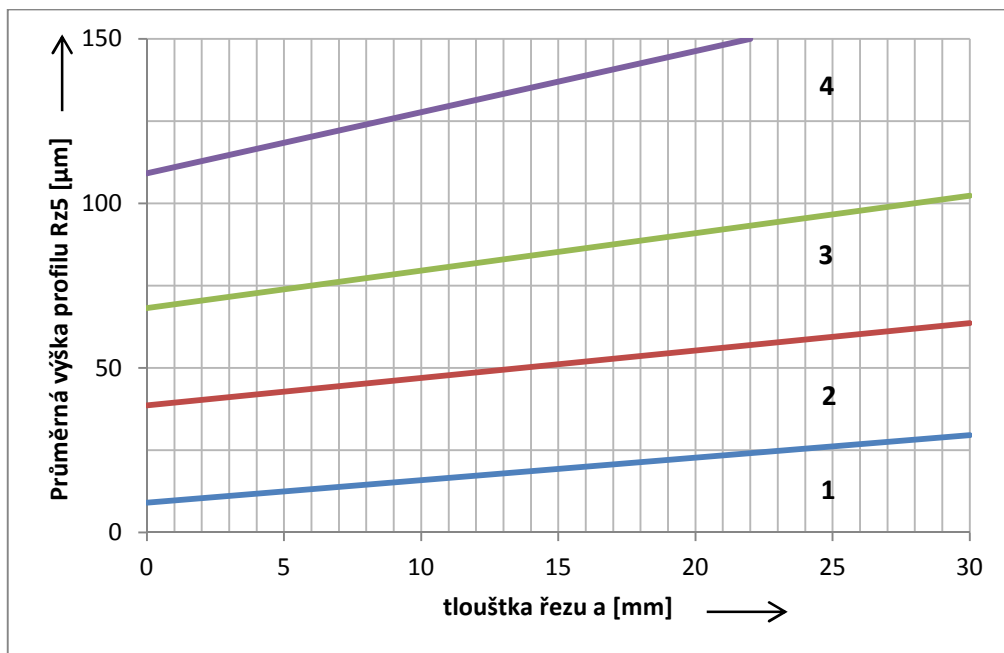
- úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka u
- průměrná výška prvků profilu Rz5

Pro hodnocení jakosti a kvality povrchu se také mohou použít parametry: natavení horní hrany r, možný výskyt okujů nebo natavených kapek kovu. Jednotlivé vady řezu mimo okujů a kapek nejsou vzaty v úvahu při definování jakosti řezu. Norma hlavně spoléhá na výše uvedené parametry u a Rz5.

Pro některé materiály a metodu nelze dosáhnout všech stupňů přesností tepelných řezů, stejně jako požadavků, které jsou definovány v této normě. Například povrch u materiálů jako je hliník, hořčík, jejich slitin a také u mosazi je hrubě rýhován z důvodu hrubozrnné struktury. Na tomto povrchu nelze určit průměrnou výšku profilu Rz5.

Naměřené hodnoty Rz5 se vyhodnocují dle grafu, který je definovaný v normě. Dle tloušťky a naměřené drsnosti Rz5 se provedený řez zařadí do některé třídy jakosti řezu. Jsou definovány 4 třídy jakosti řezu. Může se stát, že se prováděný řez nevejde ani do jedné třídy přesnosti. Grafy jsou normou určeny do řezané tloušťky 150 mm. Pro moje měření je důležitý graf v rozsahu řezaných tloušťek do 30 mm. Tento graf je zobrazen na obrázku číslo 34 [6].

Norma také udává typické dosažitelné hodnoty průměrné výšky profilu Rz5 v závislosti na tloušťce zpracovaného kusu. Tyto hodnoty jsou dány grafem a tabulkou v příloze číslo 3 [6]. Z grafu je patrné, že řezy do tloušťky 4 mm u řezání laserem řadíme do druhé třídy přesnosti. Nad 5 mm tloušťky se řezy řadí do třetí třídy přesnosti. Pro laser je určena kvalita řezu do 10 mm řezané tloušťky. Řezání kyslíkovým plamenem se pohybuje těsně na hranici mezi třídami přesnosti třetí a čtvrtou. Řezání plasmou se pohybuje ve čtvrté třídě přesnosti, přičemž se stoupající tloušťkou se řez přibližuje až na horní hranici třetí třídy.



Obr. č. 34 Graf definovaný normou ČSN EN ISO 9013 [6]

7 PRAKTICKÁ ČÁST

Úkolem v praktické části bakalářské práce bylo změření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb - YAG laserem. Vzorky, které jsem měl za úkol změřit, nařezal a poskytl k mému měření vedoucím mé bakalářské práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. Vzorky byly řezány na Yb - YAG laseru, jenž se nachází na Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Zde bylo provedeno moje experimentální měření.

7.1 Laser použitý pro řezání vzorků

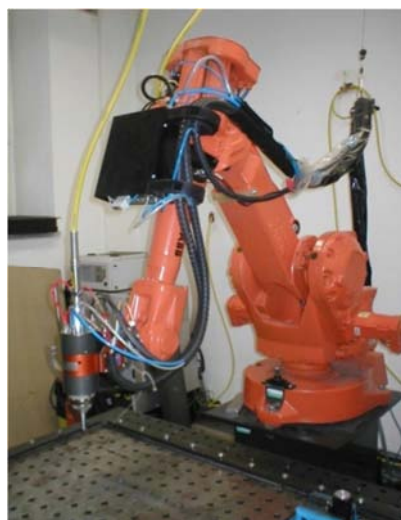
Jedná se pevnolátkový laser, jehož aktivní prostředí tvoří optická vlákna. Je to tedy vláknový laser. Optická vlákna jsou dopována vzácným prvkem Yb (ytterbiem). Aktivní prostředí je buzeno diodami.

Laserový paprsek je dopravován do řezné hlavy pomocí optického vlákna. Řezná hlava je připevněná na průmyslovém robotu. Do řezné hlavy jsou přiváděny plyny, které podporují řezný proces. Podle způsobu řezání je do místa přiváděn kyslík pro případ oxidačního řezání. Dusík je přiváděn při tavném řezání. Ocelové vzorky byly řezány oxidačním způsobem řezání. Vzorky z nerez oceli byly řezány tavným způsobem dělení.

Laser použitý pro řezání má označení YLS 2000 (PG PHOTONICS). Laser má maximální výkon 2000 W a je zobrazen na obrázku číslo 35. V příloze číslo 4 je ten samý obrázek doplněný popisky. Řezná hlava, jež byla použita pro řezání, má označení YRC 100 (PRECITEC), je zobrazena v příloze číslo 5. Obrázek je doplněn popisky jednotlivých přívodů pracovních plynů, chlazení a laserového paprsku. Robot, na němž je upevněna řezná hlava, má označení IRB 2400 (ABB) a je zobrazen na obrázku číslo 36. V příloze číslo 6 je tentýž obrázek doplněn popisky důležitých částí. V příloze číslo 7 [38] je uvedena další fotografie robotu a řezné hlavy.



Obr. č. 35 Laser YLS 2000



Obr. č. 36 Robot s řeznou hlavou

7.2 Měření vzorky [11], [23],[31]

Měřené vzorky byly ze tří různých materiálů. Jejich rozměry byly 20 x 80 mm. Vzorky řezané tavným způsobem řezání, byly z nerez oceli X10CrNi18-8 (17 240). Tloušťky vzorků z nerez oceli byly 0,8 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 3 mm, 4,8 mm.

Jedná se o austenitickou, chrom niklovou, nerezovou ocel. Je nejpoužívanějším druhem nerezové oceli. Má velmi dobrou odolnost proti atmosférické a půdní korozi, tvárnost za studena a svařitelnost.

Při sváření plechu o hloubce průvaru do 6 mm je odolná proti mezikrystalické korozi bez dodatečné tepelné úpravy. Je vhodná pro svařování elektrickým obloukem všemi způsoby, nevhodná je pro svařování plamenem.

Je odolná vůči vodě, vodní páře, vlhkosti vzduchu, jedlým kyselinám a slabým organickým a anorganickým kyselinám. Její použití je možné do teploty až 400 °C. Je dobře lešitelná, tvářitelná a tažitelná hlubokým tažením. Dobře se ohraňuje a zakružuje. Je hůře obrobitelná. Používá se ve strojařském a nukleárním průmyslu, v dopravních zařízeních, v potravinářském průmyslu, chemickém průmyslu, při výrobě chirurgických nástrojů. V tabulce číslo 5 jsou uvedeny



Obr. č. 37 Makro nerez tl 3 mm [26]

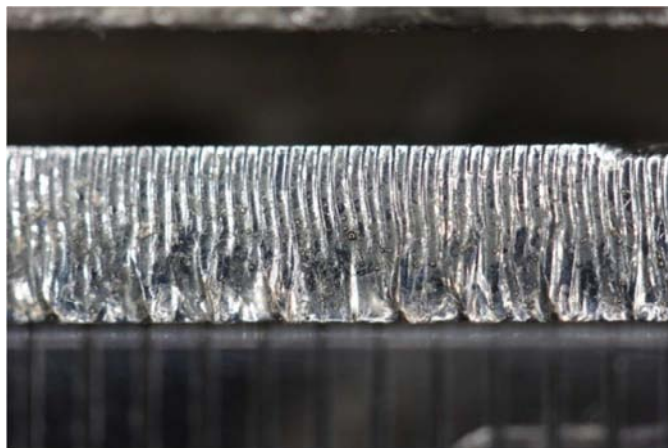
mechanické vlastnosti a chemické složení této oceli. Na obrázku číslo 37 [26] je vyfocena řezná hrana měřeného vzorku z oceli X10CrNi18-8 o tloušťce 3 mm.

Všechny řezné hrany byly vyfoceny digitálním zrcadlovým fotoaparátem Canon s makro - objektivem se dvěma kroužky. Makra všech měřených řezných hran jsou zobrazeny níže v příloze. V příloze číslo 8 [26] jsou zobrazeny řezné hrany nerez oceli.

Tab. č. 5 Parametry oceli X10CrNi18-8 (17 421)

Nerez ocel X10CrNi18-8 (17 241)									
Mez pevnosti v tahu Rm	Mez kluzu Re	Tažnost A ₁₀	Chemické složení [%]						
[MPa] max.	[MPa] max.	[%] min.	C max.	Cr max.	Ni max.	N max.	Mn max.	Si max.	P max.
520 - 720	196	20	0,07	17 - 19,5	8 - 10,5	0,11	2	0,03	0,045

Vzorky o tloušťce 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 3 mm, jež byly řezány oxidačním způsobem řezáním, byly z ocelového plechu DC 01 (11 321). Jedná se o hlubokotažnou ocel. Je to nelegovaná ocel vhodná k tváření (válcování) za studena a ke středně hlubokému tažení, lakování, pokovování v tavenině, potisku a smaltování. Svařitelnost je zaručená v závislosti na rozměrech polotovaru. Na obrázku číslo 38 [26] je vyfocena řezná hrana měřeného vzorku z oceli DC 01 o tloušťce 3 mm.



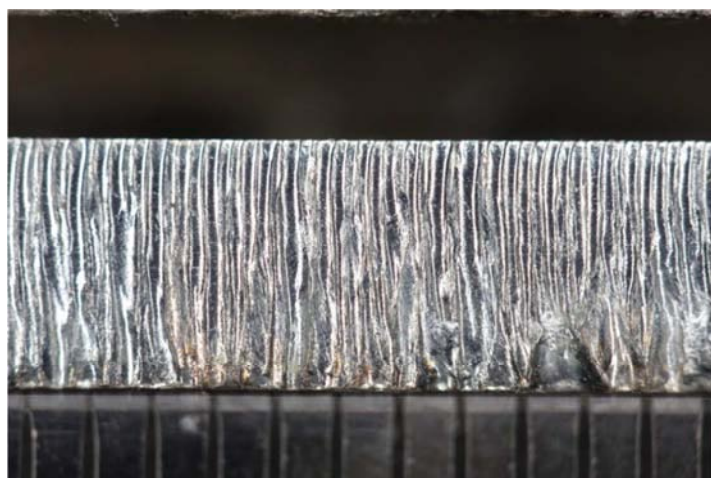
Obr. č. 38 Makro tl 3 mm [26]

Mechanické vlastnosti a chemické složení oceli DC 01 je uvedeno v tabulce číslo 6. V příloze číslo 9 jsou vyfoceny měřené vzorky z oceli DC 01 a z S235 JRG řezané oxidačním způsobem.

Tab. č. 6 Parametry oceli DC 01 (11 321)

Hlubokotažná ocel DC 01 (11 321)						
Mez pevnosti v tahu Rm	Mez kluzu Re	Tažnost A ₁₀ min	Chemické složení [%]			
[MPa]	[MPa] max.	[%]	C max.	Mn max.	P max.	S max.
280 - 380	235	29	0,1	0,45	0,03	0,03

Další vzorek, který byl řezán oxidačním způsobem řezání, byl o tloušťce 4 mm. Byl z oceli S235 JRG (11 375). Na obrázku číslo 39 [26] je vyfocena měřená řezná hrana.



Obr. č. 39 Makro tl. 4 mm [26]

Jedná se o konstrukční neušlechtilou ocel obvyklé jakosti. Je vhodná ke svařování, pro součásti konstrukcí a strojů středních tlouštěk tavně svařované, namáhané staticky i dynamicky. Dále je vhodná pro součásti vyráběné z plechů, podélně svařovaných dutých profilů

a součásti kované pro tepelná energetická zařízení a tlakové nádoby pracující s omezeným přetlakem a teplotou do 300 °C. Používá se pro výrobu vtokových objektů vodních turbín, spirálních skříní vodních turbín, vrata plavidlových komor, klapky uzávěrů, svařované kulové uzávěry, spojky a podvozky vagónů. Její mechanické vlastnosti a chemické složení je uvedeno v tabulce číslo 7. Celkem tedy bylo měřeno 5 vzorků, které byly řezány oxidačním způsobem řezání.

Tab. č. 7 Parametry oceli S235 JRG (11 375)

Konstrukční ocel S235 JRG (11 375)						
Mez pevnosti v tahu Rm	Mez kluzu Re	Tažnost A ₁₀ min	Chemické složení [%]			
[MPa] max.	[MPa] max.	[%]	C max.	P max.	S max.	N max.
450	196	20	0,17	0,045	0,045	0,045

Na obrázku číslo 40 jsou vyfoceny měřené vzorky. Vlevo pod sebou jsou vzorky oxidačně řezané, vpravo pod sebou jsou vzorky řezané tavným způsobem.



Obr. č. 40 Měřené vzorky

7.3 Řezné parametry při řezání vzorků.

Měřené vzorky byly řezány na výše uvedeném laseru a robotu. Při řezání byly nastavovány řezné parametry. Tyto parametry ovlivňují kvalitu řezu, a tedy i výslednou drsnost řezné hrany vzorku. Pro jednotlivé tloušťky se řezné parametry lišily. Parametry byly voleny vzhledem k materiálu, jeho tloušťce a použité metodě řezání. Nastavené řezné parametry pro nerezovou ocel řezanou tavnou metodou řezáním jsou uvedeny v tabulce číslo 8.

Parametr zóna, který je uváděn v tabulkách, je hodnota, která udává robotovi toleranci najetí na zadaný bod. Zóna je kruhové pole kolem tohoto bodu. Zóny jsou značeny od jedničky výše. Zóna s menší číselnou hodnotou znamená přesnější najetí. Nula znamená nejvyšší přesnost najetí, kterou je robot schopen.

Tab. č. 8 Řezné parametry pro nerezovou ocel - tavný způsob řezání

Řezné parametry – tavný způsob řezání - ocel X10 CrNi 18-8 (17 241)						
Tloušťka [mm]	0,8	1	1,5	2	3	4,8
Výkon [W]	1500	2000	1500	1500	2000	2000
Tlak plynu [bar]	8	9	9	9	9	9
Rychlost [mm/s]	50	60	60	60	30	10
Zóna	0	0	0	0	0	0
Poloha Ohniska [mm]	-1	-2	-4	-4	-5	-5
Odstup trysky [mm]	0,6	0,7	0,7	0,7	1	1
Průměr trysky [mm]	1	1	1	1	2	2

Při řezání u vzorku o tloušťce 3 mm vznikaly kuličky a ostré otřepty zhruba o velikosti 0,2 mm. U vzorku o tloušťce 4,8 mm při řezání vznikaly dlouhé ostré otřepty.

Řezné parametry pro hlubokotažnou a konstrukční ocel, které byly řezány oxidačním způsobem řezání, jsou uvedeny v tabulce číslo 9.

Tab. č. 9 Řezné parametry pro ocele – oxidační způsob řezání

Řezné parametry – oxidační způsob řezání					
	Ocel DC 01 (11 321)				Ocel S235 JRG (11 375)
Tloušťka [mm]	1	1,5	2	3	4
Výkon [W]	2000	2000	2000	1000	1000
Tlak plynu [bar]	3	3	4	1,5	1,5
Rychlost [mm/s]	50	50	40	30	30
Zóna	0	0	0	0	0
Poloha Ohniska [mm]	-2	-2	-2	-5	-5
Odstup trysky [mm]	0,7	0,7	0,7	0,7	1
Průměr trysky [mm]	1	1	1	1,2	1,2

7.4 Měření drsnosti řezných hran vzorků

V praktické části bakalářské práce jsem měřil drsnosti řezných hran zadaných vzorků. Měření bylo provedeno na Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Byl použitý digitální drsnoměr: MarSurf M300. Ten komunikuje s posuvnou jednotkou MarSurf RD 18 přes bluetooth. Posuvná jednotka obsahuje snímač PHT 6 - 350. Celý tento drsnoměr je přenosný a napájený bateriemi. Na obrázku číslo 41 je použitý drsnoměr MarSurf M300 i s posuvnou jednotkou. Pro zaručení stálosti polohy vzorku během měření byl použitý strojní svěrák. Níže jsou uvedeny některé údaje o drsnoměru a jeho označení.



Obr. č. 41 Drsnoměr s posuvnou jednotkou

Označení drsnoměru:

MarSurf M300

Výrobce:

Mahr GmbH – Göttingen

Označení na štítku přístroje:

TAMB2300 Contains FCC – IDR7TAMB2300

Výrobní číslo:

6910402.

Tovární označení:

1860/10

Identifikační označení Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.:

Drsnoměr M300 D3 – 001016 – 0000

Označení posuvné jednotky:

MarSurf RD 18

Výrobce:

Mahr GmbH – Göttingen

Označení na štítku přístroje:

Contains FCC – ID R7TAMB2300

Výrobní číslo:

6910403

Tovární označení:

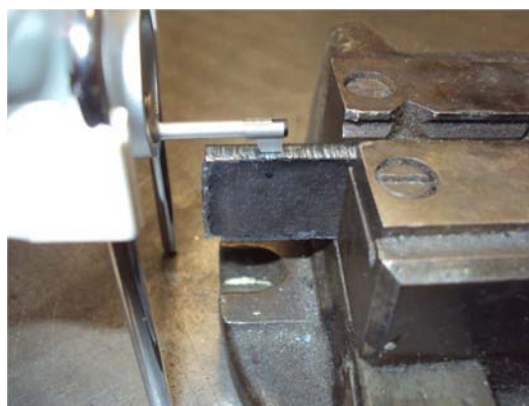
1875/10

Před samotným měřením byl drsnoměr uveden do pracovního stavu. Byl spojen pomocí bluetooth s posuvnou jednotkou. Před prvním měřením byla provedena kalibrace drsnoměru. Přístroj tuto kalibraci provádí pomocí automatického programu před prvním měřením. Předběžná drsnost byla odhadnuta mezi hodnotami $2 < Ra \leq 10$. Na přístroji byla nastavena vzhledem k velikosti vzorku základní délka $l_r = 0,25$ mm, pětinašobek této hodnoty tvoří vyhodnocovaná délka $l_n = 1,25$ mm. Celková délka l_t i s nájezdy a přejezdy byla 1,75 mm. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou postupně uváděny v tabulkách níže.

Dle normy ČSN EN ISO 9013 bylo měření prováděno přibližně v 1/2 od vrchní strany řezu pro plechy do tloušťky do 2 mm. Silnější plechy byly měřeny v 1/3 tloušťky řezné hrany od vrchní strany řezu. Na obrázku číslo 42 vlevo je zobrazeno jakým způsobem probíhalo měření a na obrázku číslo 43 vpravo je zobrazen vzorek při měření zblízka.

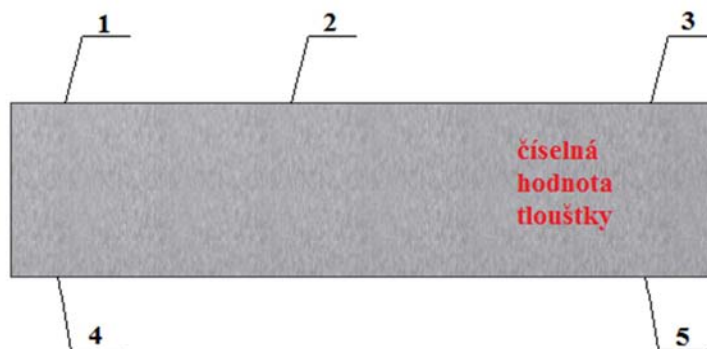


Obr. č. 42 Měření vzorku



Obr. č. 43 Vzorek při měření zblízka

Vzorky byly při měření postupně upnuty do strojního svěraku a měřeny. Každý vzorek byl měřen pětkrát, pokaždé na jiném místě. Měření bylo prováděno na delších stranách vzorku, tedy na délkovém rozměru 80 mm. Vždy byla měřena drsnost přibližně 1 cm od kraje a jedno měření co nejvíce uprostřed, dle možnosti vyložení pohyblivého ramene. Pak byl vzorek otočen a měřena druhá řezná hrana o délce 80 mm. Zde byla provedena dvě měření opět přibližně 1 cm od kraje. Jednotlivá místa měření jsou znázorněna na obrázku číslo 44, zde jsou naznačeny místa jednotlivých měření.



Obr. č. 44 Označená měřící místa na vzorku

7.5 Vyhodnocení hodnot pro tavný způsob řezání nerezové oceli

Pro následné vyhodnocení naměřených dat dle normy ČSN EN ISO 9013 bylo nutné spočítat střední hodnotu z naměřených hodnot a směrodatnou odchylku.

Výpočty byly provedeny v tabulkovém editoru Microsoft Excel 2010. Zde byla použita funkce pod názvem MEDIÁN (argument), tato funkce vypočte střední hodnotu ze základního vybraného souboru, který byl vybrán jako argument. Jako argument byla vybrána naměřená data.

Pro směrodatnou odchylku byla použita funkce pod názvem SMODCH.P (argument), tato funkce vypočte směrodatnou odchylku ze základního souboru, který byl zadán jako argument dat. Tyto hodnoty byly dále zpracovány. A vyneseny do grafu, který je definován normou ČSN EN ISO 9013. Tento graf zobrazuje kvalitu povrchu jako funkci tloušťky materiálu. Na svislé ose je průměrná výška profilu Rz5 a na vodorovné ose je tloušťka materiálu. Naměřené hodnoty byly vyneseny do grafu, aby bylo možno určit, ve které třídě přesnosti se nacházejí jednotlivé řezy. Střední hodnota je pro určitou tloušťku vzorku vynesena jako bod, který tvoří střed úsečky. Velikost úsečky je definována hodnotou směrodatné odchylky naměřených hodnot.

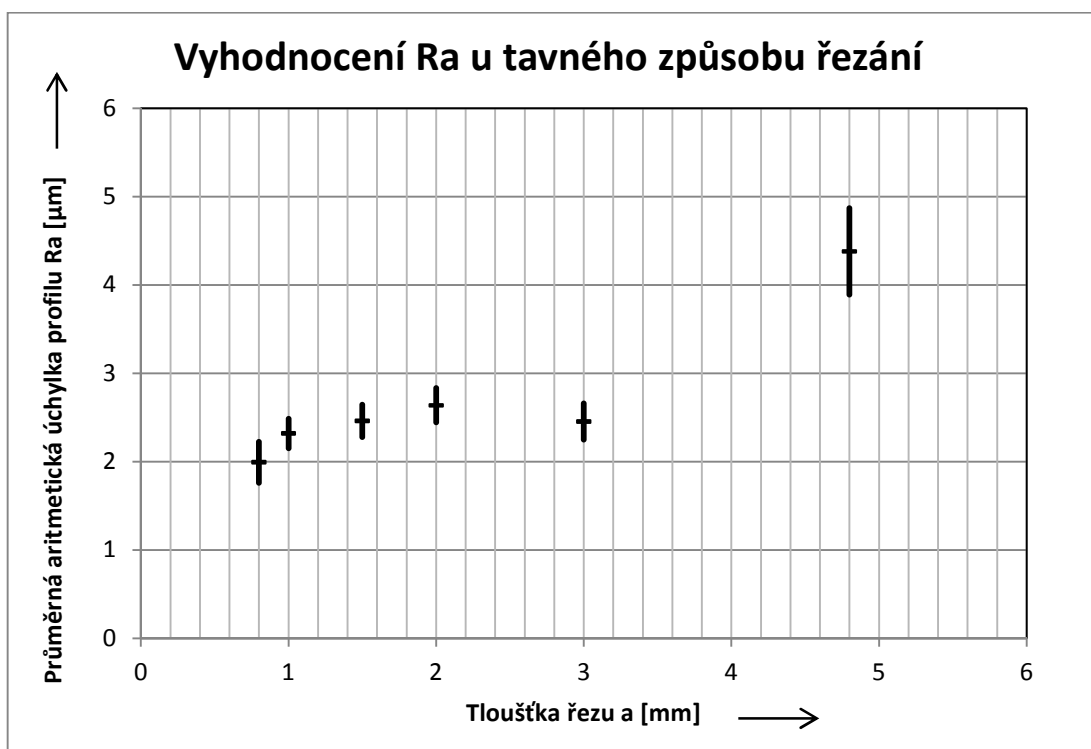
Hodnoty Ra drsnosti pro nerezový plech X10CrNi18-8, který byl řezán tavným způsobem, jsou uvedeny v tabulce číslo 10. Zde jsou uvedeny vypočítané hodnoty parametru Ra, tedy střední hodnoty Ra a směrodatné odchylky hodnot Ra.

Tab. č. 10 Naměřené hodnoty Ra pro nerezovou ocel

Tavný způsob řezání oceli X10CrNi18-8							
Tloušťka vzorku [mm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra [μm]					Střední hodnota Ra [μm]	Směrodatná odchylka Ra [μm]
	Měření č.1	Měření č.2	Měření č.3	Měření č.4	Měření č.5		
0,8	1,735	1,712	1,993	2,871	2,563	1,993	0,464
1	2,319	2,520	2,241	2,273	3,136	2,319	0,334
1,5	3,096	2,460	2,146	2,271	2,910	2,460	0,367
2	2,979	3,424	2,530	2,637	2,312	2,637	0,389
3	1,605	2,453	2,776	2,326	2,665	2,453	0,411
4,8	5,087	3,427	4,380	2,495	4,949	4,380	0,979

Byly měřeny hodnoty Ra a Rz5. Oba parametry byly vyneseny do grafů. Norma vyhodnocuje pouze parametr Rz5, pro který jsou definovány jednotlivé třídy přesnosti. Pro parametr Ra nejsou v normě definovány třídy přesnosti. Hodnoty Ra byly také zpracovány pro lepší představu o kvalitě povrchu vzorků a pro možnost kontroly a srovnání s parametrem Rz5.

Následně je zobrazen na obrázku číslo 45 graf, kde jsou vyneseny střední hodnoty a směrodatné odchylky pro parametr Ra. Z grafu je možné vyčíst, že drsnost řezu se zvyšuje se zvyšující se tloušťkou vzorku přibližně lineárně. Řezné parametry se od sebe výrazně neliší. Výjimku tvoří vzorek o tloušťce 3 mm. Kde je kvalita výrazně vyšší než u ostatních vzorků. Lze usuzovat dle tabulky nastavených řezných parametrů, že kvalitnější povrch je získán nižší nastavenou řeznou rychlostí. Řezná rychlost je v případě plechu o tloušťce 3 mm nastavená na hodnotu 30 mm/s, u ostatních vzorků se rychlost pohybuje okolo 50 - 60 mm/s.



Obr. č. 45 Zpracované hodnoty Ra

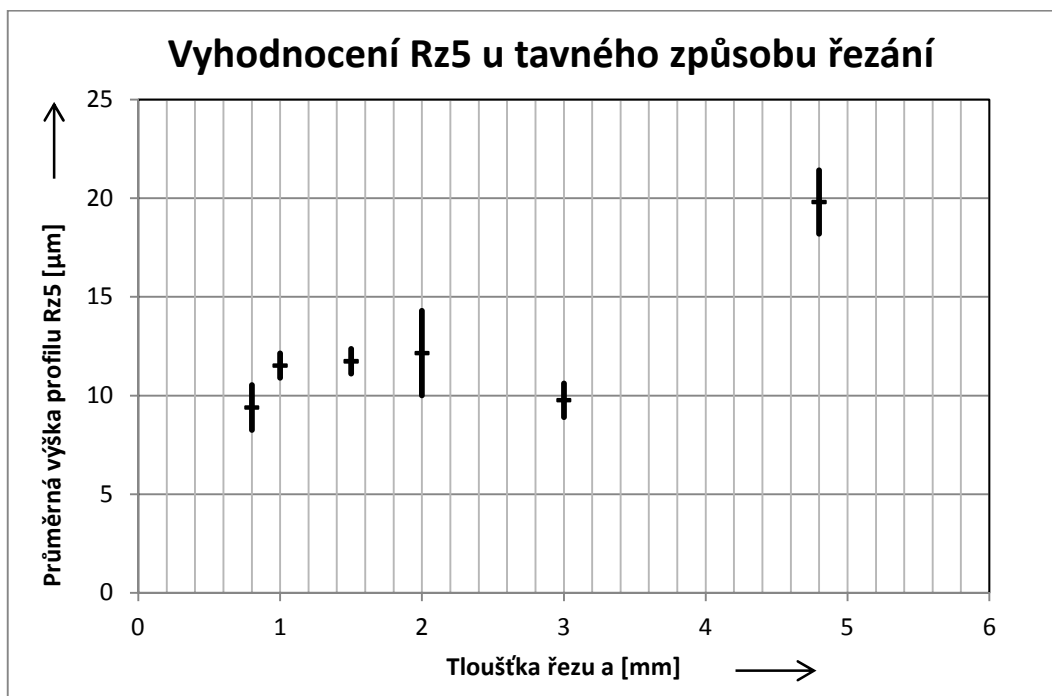
Nyní následuje zpracování parametru Rz5, který je důležitý pro porovnání a vyhodnocení dle normy ČSN EN ISO 9013. Zpracování dat je stejné jako v předešlém případě. Byly určeny střední hodnoty a hodnoty směrodatných odchylek a byly zaneseny do grafu. Na svislé ose je hodnota největší výšky profilu závislá na tloušťce plechu. Pro hodnoty Rz5 jsou v normě definovány třídy přesnosti. Nyní lze tedy vyhodnotit kvalitu jednotlivých řezů a zařadit je do tříd přesnosti.

Hodnoty Rz5 drsnosti pro nerezový plech X10CrNi18-8, který byl řezán tavným způsobem, jsou uvedeny v tabulce číslo 11. Zde jsou uvedeny vypočítané hodnoty parametru Rz5, tedy střední hodnota Rz a směrodatná odchylka Rz5.

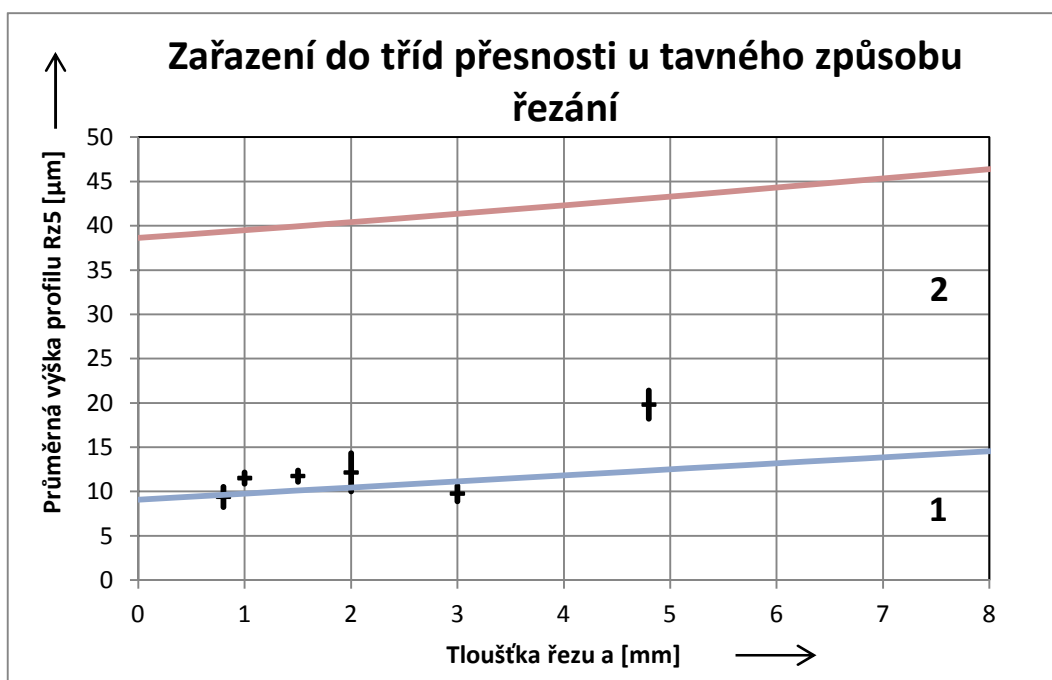
Tab. č. 11 Naměřené hodnoty Rz5 pro nerezovou ocel

Tavný způsob řezání oceli X10CrNi18-8							
Tloušťka vzorku [mm]	Průměrná výška profilu Rz5 [µm]					Střední hodnota Rz [µm]	Směrodatná odchylka Rz [µm]
	Měření č.1	Měření č.2	Měření č.3	Měření č.4	Měření č.5		
0,8	7,437	7,318	9,392	12,900	11,890	9,392	2,275
1	10,440	11,520	10,790	11,530	14,000	11,520	1,246
1,5	11,740	12,700	9,276	10,090	11,870	11,740	1,257
2	21,750	14,290	12,150	10,960	9,547	12,150	4,297
3	7,846	9,761	11,300	9,402	12,840	9,761	1,706
4,8	20,550	13,690	20,200	13,620	19,810	19,810	3,208

Zpracované hodnoty parametru Rz5 jsou na další stránce na obrázku číslo 46. Zařazení do tříd přesnosti je zobrazeno samostatně na obrázku číslo 47.



Obr. č. 46 Zpracované hodnoty Rz5



Obr. č. 47 Zařazení do tříd přesnosti – nerez ocel

Průběh kvality řezu u jednotlivých tloušťek je přibližně lineární podobně jako u parametru Ra. Vzorek o tloušťce 3 mm má nejkvalitnější řez a odchyluje se od lineárního průběhu, a to díky menší nastavené řezné rychlosti v porovnání s ostatními vzorky.

Vzorek o tloušťce 3 mm se pohybuje v první třídě přesnosti. Vzorek o tloušťce 0,8 mm se pohybuje na hranici třídy přesnosti první a druhé třídy. Ostatní vzorky tedy o tloušťkách 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 4,8 mm se řadí do druhé třídy přesnosti. V porovnání s grafem v normě, kde jsou znázorněny typicky dosažitelné hodnoty průměrné výšky profilu Rz5 v závislosti na tloušťce zpracovaného kusu pro laserové řezání, jsou vyhodnocované řezy lepší.

7.6 Vyhodnocení hodnot pro oxidační způsob řezání uhlíkové oceli

U těchto vzorků probíhalo měření a vyhodnocování stejně jako u vzorků z nerezové oceli. Rozdíly byly v materiálu, ve způsobu řezání, v nastavení řezných parametrů a v použití řezného plynu. U předešlého způsobu řezání byl použitý dusík. Zde u oxidačního způsobu řezání byl použitý kyslík. V tabulce číslo 12 jsou uvedeny naměřené parametry Ra pro vzorky řezané oxidačním způsobem řezání. V tabulce číslo 13 jsou uvedeny naměřené hodnoty Rz5 pro vzorky řezané oxidačním způsobem řezání.

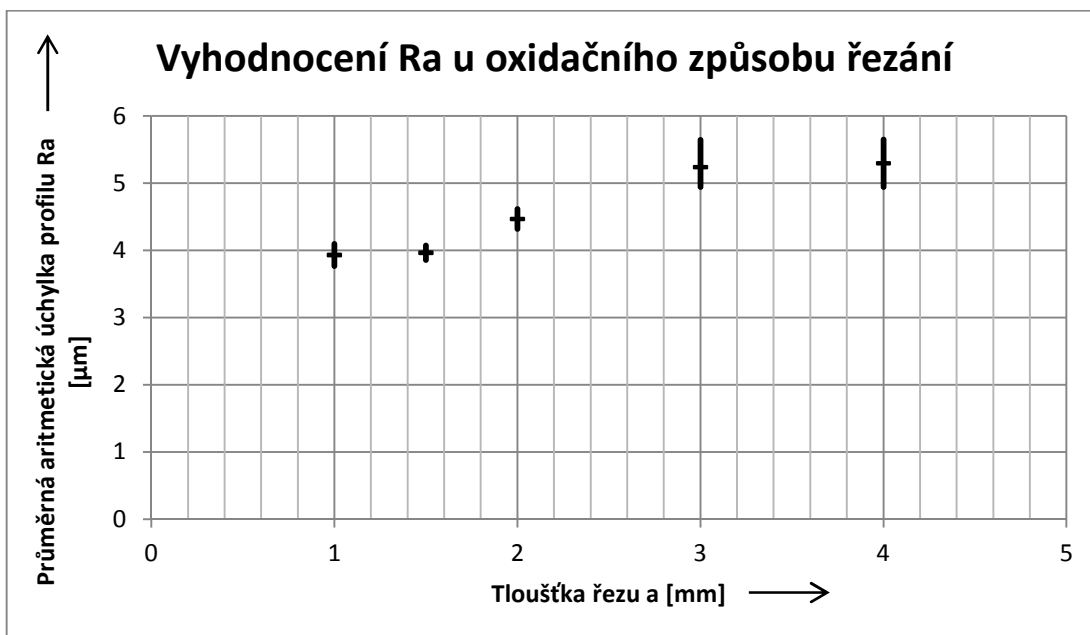
Tab. č. 12 Naměřené hodnoty Ra pro hlubokotažnou a konstrukční ocel

Oxidační způsob řezání oceli DC 01 a S235 JRG							
Tloušťka vzorku [mm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra [μm]					Střední hodnota Ra [μm]	Směrodatná odchylka Ra [μm]
	Měření č.1	Měření č.2	Měření č.3	Měření č.4	Měření č.5		
1	4,030	3,931	3,374	3,239	3,941	3,931	0,328
1,5	4,003	3,674	3,965	4,190	3,622	3,965	0,213
2	4,468	3,973	4,498	4,897	4,444	4,468	0,293
3	4,365	6,474	5,239	4,202	5,342	5,239	0,814
4	4,717	5,297	6,426	5,179	6,458	5,297	0,702

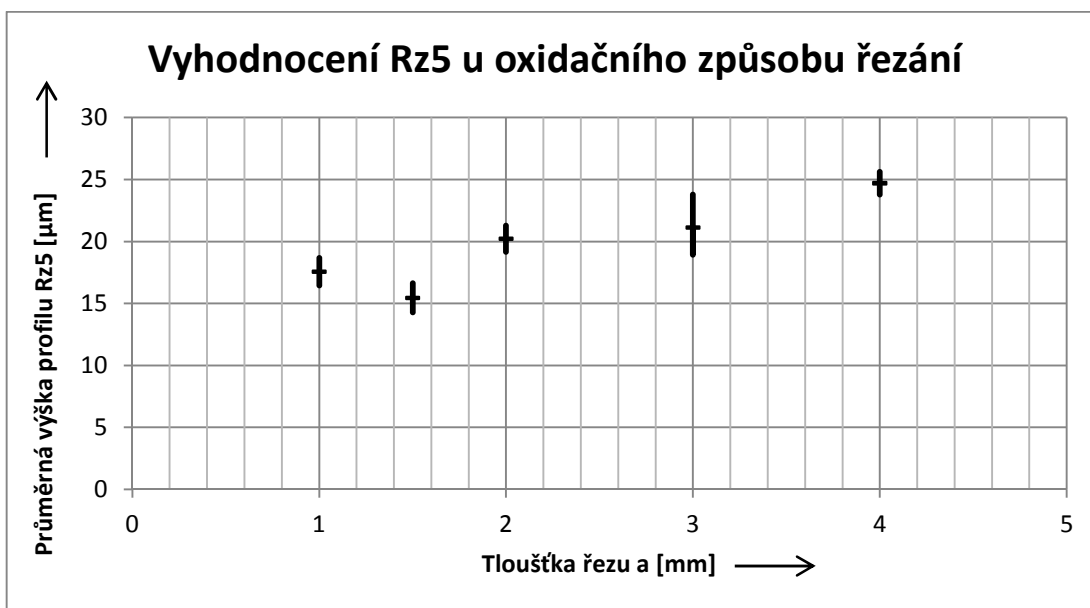
Tab. č. 13 Naměřené hodnoty Rz5 pro hlubokotažnou a konstrukční ocel

Oxidační způsob řezání oceli DC 01 a S235 JRG							
Tloušťka vzorku [mm]	Průměrná výška profilu Rz5 [μm]					Střední hodnota Rz [μm]	Směrodatná odchylka Rz [μm]
	Měření č.1	Měření č.2	Měření č.3	Měření č.4	Měření č.5		
1	18,460	17,640	16,830	12,220	17,560	17,560	2,222
1,5	14,770	15,240	18,560	20,860	15,450	15,450	2,358
2	22,270	15,840	20,220	20,630	19,750	20,220	2,128
3	17,280	28,980	19,000	18,200	22,060	19,000	4,253
4	21,730	24,700	25,980	22,900	26,620	24,700	1,838

Na obrázku číslo 48 jsou naměřené hodnoty Ra vyneseny do grafu dle normy. Průběh kvality povrchu je vzestupný. Se zvětšující se tloušťkou řezaného plechu se zvyšuje i drsnost řezu. Rozdíly v nastavených parametrech jsou u dvou posledních vzorků. Zde je snížena řezná rychlost. Zároveň s rychlostí je snížena i výkon, z toho důvodu se nijak nezvýšila kvalita řezu oproti ostatním. Je také nutno podotknout, že se jedná o dva různé materiály. Je zde snížena i tlak plynu a jiná poloha ohniska. Dále na obrázku číslo 49 je znázorněn graf s vnesenými hodnotami parametru Rz5 pro prováděné řezy.

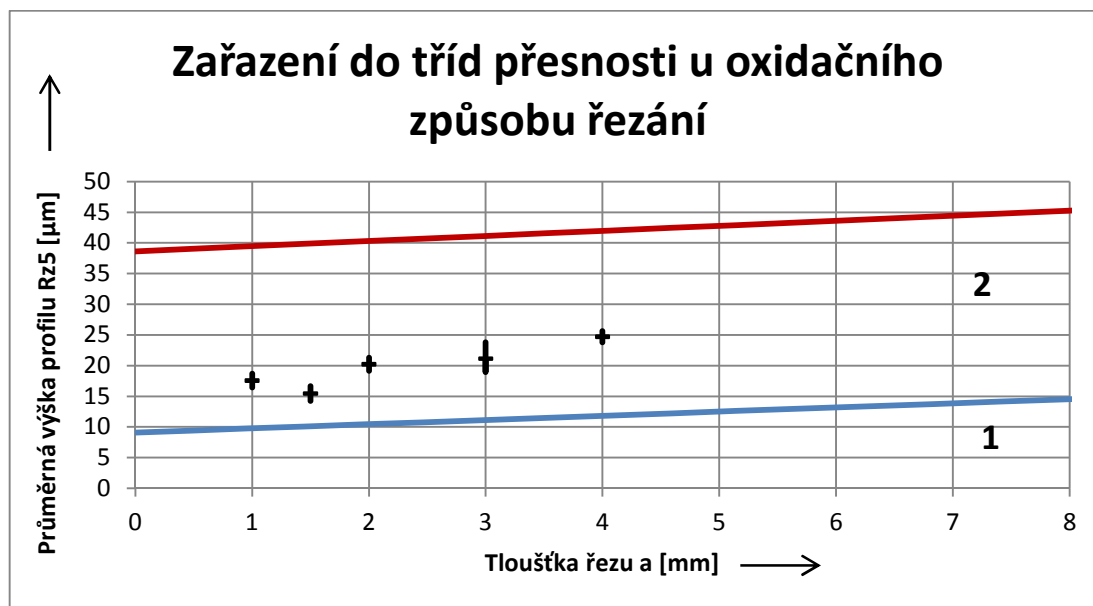


Obr. č. 48 Zpracované hodnoty Ra



Obr. č. 49 Zpracované hodnoty Rz5

Na obrázku číslo 50 je znázorněno zařazení jednotlivých řezů do tříd přesnosti dle normy ČSN EN ISO 9013.



Obr. č. 50 Zařazení do tříd přesnosti – uhlíkové oceli

Vyhodnocení parametru Rz5 ukazuje mnohem výrazněji, než bylo vidět na vyhodnocení parametru Ra, že pro vzorek o tloušťce 1,5 mm nejlépe vyhovovaly nastavené řezné parametry. Kvalita hrany je tedy lepší než u vzorku o tloušťce 1 mm, který má úplně stejně nastavené řezné parametry. Jeho kvalita je také lepší než u následujícího vzorku o tloušťce 2 mm. U toho se však nastavené řezné parametry nepatrně liší. Je zde nastaven nižší tlak plynu a nižší řezná rychlost.

Všechny řezy provedené oxidačním způsobem řezání jsou zařazeny do druhé třídy přesnosti. Ve výsledku lze říci, že pro provádění řezu byl tavný způsob řezání přesnější s lepšími výsledky v kvalitě řezu než oxidační způsob řezání. To však neplatí obecně, záleží hlavně na vhodném nastavení řezných parametrů. V porovnání s grafem v normě – příloha číslo 3, kde jsou znázorněny typicky dosažitelné hodnoty průměrné výšky profilu Rz5 v závislosti na tloušťce zpracovaného kusu pro laserové řezání, vyhodnocované řezy přibližně odpovídají těmto hodnotám.

8 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se skládá z teoretické části a z praktické části. V teoretické části byly z uvedených zdrojů popsány základy laserové technologie, druhy laserů, jejich použití. Blíže je popsáno řezání laserem a dále je popsáno měření drsnosti a norma ČSN EN ISO 9013, která hodnotí kvalitu řezu při tepelném dělení materiálu a zařazuje jednotlivé řezy do tříd přesnosti podle drsnosti řezných hran. V praktické části bylo provedeno měření drsnosti řezných hran ocelových plechů a vyhodnocení kvality řezu dle normy ČSN EN ISO 9013. Vzorky byly řezány vláknovým laserem dvěma způsoby laserového dělení, tavným způsobem a oxidačním způsobem laserového řezání. Při měření drsnosti byla zvolena vyhodnocovaná délka kratší, než je doporučována tabulkou číslo 3 v kapitole 7.1, z důvodu malých rozměrů měřených vzorků a dostatečného počtu prováděných měření.

Řezy na vzorcích z nerez oceli, které byly řezané tavnou metodou, se pohybovaly v první a druhé třídě přesnosti. Velký vliv na kvalitu řezu mají nastavené řezné parametry, které se lišily pro jednotlivé tloušťky plechu. Nevhodně byly nastaveny parametry pro tloušťku 4,8 mm. Tento řez se nejvíce odchyluje od ostatních a narušuje lineární stoupání drsnosti. Naopak nejvhodněji byly nastaveny řezné parametry pro vzorek o tloušťce 3 mm. V porovnání s typicky dosahovanými hodnotami, které jsou udávány v normě ČSN EN ISO 9013, jsou vyhodnocované řezy lepší.

Řezy prováděné oxidačním způsobem laserového řezání se pohybovaly ve druhé třídě přesnosti. Odpovídají tak typicky dosahovaným hodnotám, které jsou udávány v normě ČSN EN ISO 9013. Přibližně lineární průběh narušuje vzorek o tloušťce 1,5 mm. U tohoto vzorku byly nejvhodněji zvoleny řezné parametry a řez je oproti ostatním řezům lepší.

Je nutné zmínit, že kvalita řezu při laserovém dělení kovů také závisí na druhu použitého laseru. Vzhledem k odlišné závislosti absorpce CO₂ laseru a vláknového laseru mají i výsledné řezné hrany odlišný charakter. Obecně lze konstatovat, že kvalita řezných hran při použití CO₂ laseru je vyšší.

Vláknový laser je však lepší na údržbu, má menší provozní náklady a jednodušší konstrukci. Proto se na zvýšení kvality řezu zvláště u sinějších materiálů celosvětově pracuje. Vláknový nebo obecně pevnolátkový laser je vhodnější k řezání tenkých plechů, je rychlejší a vytváří užší řez než CO₂ laser. CO₂ laser má naopak lepší výsledky pro řezání silnějších materiálů.

Pro dělení byl použitý vláknový laser, který byl k dispozici, proto byly vzorky voleny co nejtenčí ze zadaného rozsahu tlouštěk 1 – 20 mm.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [5]

- [1] AMADA. *Cutting Know-how for Amada lasers*. Schaumburg, 2011, 18 s. Dostupné z: <http://www.amada.com/>
- [2] Aplikace laserů. JELÍNKOVÁ, Helena. *Aplikace laserů* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1998 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://pascal.fjfi.cvut.cz/~drska/edu/webfyz/lasery/>
- [3] BENKO, Bernard, Peter FOLDEREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové Technológie*. 1. vydání. Bratislava: Tlač vydavateľstvo STU v Bratislavě, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
- [4] BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření pro SPŠ strojní*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2009, 206 s. ISBN 978-80-7333-072-9.
- [5] *Citace.com* [online]. 2004. vyd. KMa Webdesing, 2004, 25.03.2013 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://www.citace.com/>
- [6] ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. 2003. vyd. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2003.
- [7] DRÁBEK, Michal. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-03-01]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54189. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
- [8] *Drsnost jako součást struktury povrchu: sborník přednášek ze semináře, Brno 13. února 2002*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2002, 88 s. ISBN 80-214-2063-4.
- [9] DVOŘÁK, Jaromír. *Integrita rozhraní materiálů obráběných progresivními technologiemi*. Brno, 2009. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Miroslav Píška.
- [10] *ESAB* [online]. Česká republika, 2013 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/cz/cz/news/image-archive.cfm>
- [11] Feromat: Hutní a spojovací materiál. *Jakosti ocelí* [online]. Brno, 2013 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
- [12] FORMÁNEK, Jiří. *Úvod do kvantové teorie*. Vyd. 2., upr. a rozš. Praha: Academia, 2004, 502, 11 s. ISBN 80-200-1176-5.
- [13] HS - TECH. *Řezání laserem* [online]. Lanškroun, 2013 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.hs-tech.cz/rezani-laserem>
- [14] *Hutnické aktuality: Laserové technologie opracování kovových materiálů*. Výzkumný ústav hutnictví a železa: Informetal, 1988, roč. 29, č. 1. ISSN 0322-8525.
- [15] CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi I.: Přednáška č. 4* [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2013-04-02]. 1. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_4prez.pdf

- [16] JANÍČKOVÁ, Petra. *Nekonvenční technologie obrábění - Laser* [online]. Uherské Hradiště: Střední odborová škola technická, 2010, 30.06.2012 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://projekty.tauh.cz/projekt-sblizovani/pdf/laser-projekt-sablona.pdf>
- [17] KACHTÍK, Lukáš. Součásti laseru. *Součásti laseru* [online]. [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/soucasti.html>
- [18] 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.
- [19] Konstrukce: Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství. *Vliv technologických parametrů na vznik vad při tepelném dělení materiálů kyslíkem* [online]. 2009, roč. 7 [cit. 2013-03-30]. ISBN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vliv-technologickych-parametru-na-vznik-vad-pri-tepelnem-deleni-materialu-kyslikem/>
- [20] KUSALA, Jaroslav. *Lasery kolem nás* [online]. 2004. vyd. [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>
- [21] Lao Lasery a optika. KOŘÁN, Pavel. *Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting)* [online]. Praha, 20.05.2011 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [22] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. 2010. vyd. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, o.p.s., 2010. 1, 1. ISBN 978-80-87-240-65-6.
- [23] LEINVEBER, Jan. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. dopl. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006, xiv, 914 s. ISBN 80-736-1033-7
- [24] LINDE. Fact About. Laser Technology: Laser basic. Höllriegelskreuth, 2005. Dostupné z: http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/_FactsAbout_LasertBasics..pdf
- [25] Lintech. *Lintech: Laserové vrtání* [online]. 2009. vyd. 2009, 2011 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-vrtani>
- [26] MRŇA Libor - Konzultace
- [27] MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser*. Brno, 2012.
- [28] NOVÁK, Jiří. Lasery a moderní fyzika. NOVÁK, Jiří. *Katedra fyziky* [online]. 2009. vyd. 2009 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/vyuka/lasery-moderni-fyzika?prezentace>
- [29] NOVÁK, Miroslav. Lao Lasery a optika. In: NOVÁK, Miroslav. *Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu* [online]. 15.03.2011 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [30] NOVÁK, Miroslav. Lao lasery a optika: Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. NOVÁK, Miroslav. *Lao info: Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. 2011. vyd. 2011, 15.03.2011 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>

- [31] NOVEL. *Materiálové normy* [online]. MaM Multimedia, 2011 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.novel.sk/materialove-normy/>
- [32] Oblast použití. *Trumpf Česká republika* [online]. 2013. vyd. Praha, 2013 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/sublimacni-rezani.html>
- [33] Optoelektronické prvky. *Laserová dioda* [online]. 2012 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~houlec/www/htm/LD.htm>
- [34] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Typy laserů* [online]. 2006. vyd. 2008, 24.09.2008 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/785-typy-laseru>
- [35] ROHAN, Pavel. Zásobování laseru technickými plyny od Air Product. *Neděle u Bouvines, 27. červenec 1214* [online]. Praha: Argo, 1996, roč. 14, č. 1 [cit. 2013-03-29]. ISSN 1214-4983. Dostupné z: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/issue/SS101.pdf>
- [36] ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. Lasery, laserové technologie a troje s laserem. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2006, roč. 2006, č. 7, 17.07.2006 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
- [37] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEŘEČANINOVÁ. Lasery, laserové technologie a troje s laserem. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2008, roč. 2008, č. 5, 12.05.2008 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody>
- [38] ŘEŘUCHA Jan
- [39] Sandvik: Coromant. *Měření jakosti povrchu* [online]. 2013 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/measuring_surfaces/Pages/default.aspx
- [40] VACULKA, Jakub. *Měření drsnosti hran při laserovém dělení kovů* [online]. Brno, 2012, 2012 [cit. 2013-02-25]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5146/2012_BP_Vaculka_Jakub_126436.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Vysoké učení technické Brno. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
- [41] VRBOVÁ, Miroslava. *Lasery a moderní optika - oborová encyklopedie*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1994, 474 s. ISBN 80-858-4956-9.
LINDE. Fact About. Laser Technology: Laser basic. Höllriegelskreuth, 2005. Dostupné z: http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/_FactsAbout_LasertBasics.pdf

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	[-]	Součinitel absorpce
A ₁₀	[%]	Tažnost
CNC	[-]	(Computer Numerical Control) - Počítačem číslicově řízený stroj
CW		(Continuous Wave) – Kontinuální režim laseru
E1	[-]	Energetická hladina elektronu o nižší energii než má hladina E2
E2	[-]	Energetická hladina o vyšší energii než má hladina E1
Er	[-]	Chemický prvek erbium
I	[W/cm ²]	Plošná intenzita výkonu
LASER	[-]	(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) - zesílení světla stimulovanou emisí záření
Nd	[-]	Chemický prvek neodým
P	[μm; W]	Parametr profilu vypočítaný ze základního profilu; výkon
R	[μm]	Parametr profilu vypočítaný z profilu drsnosti
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu
Re	[MPa]	Mez kluzu materiálu
Rf	[-]	Součinitel odrazivosti (reflexivity)
Rm	[MPa]	Mez pevnosti materiálu
Rp	[μm]	Výška největšího výstupku profilu
Rv	[μm]	Největší výška prohlubně profilu
Rt	[μm]	Výška profilu drsnosti
Rz	[μm]	Největší výška základního profilu
Rz5	[μm]	Průměrná výška profilu
TEM	[-]	Transverse Electromagnetic Mode - Módová struktura paprsku
TEM 00	[-]	(Transversal Electromagnetic Mode of order 00) Módová struktura paprsku 00 - Gaussovo rozložení
Tm	[-]	Chemický prvek thulium
W	[μm]	Parametr profilu vypočítaný z profilu nerovností
YAG	[-]	Yttrium Aluminum Grenade – Yttriový hlinitý granát (Y ₃ Al ₅ O ₁₂)
Yb	[-]	Chemický prvek ytterbium
f ₁₂	[Hz]	frekvence kmitání odpovídající přechodu E ₁ /E ₂
h	[J.s]	Planckova konstanta = 6,63 · 10 ⁻³⁴ J · s
ln	[mm]	Vyhodnocovaná délka při měření drsnosti
lr	[mm]	Základní délka při měření drsnosti
lt	[mm]	Celková délka pohybu hrotu při měření drsnosti
r	[mm]	Natavení horní hrany
u	[mm]	Kolmost řezu v normě ČSN EN ISO 9013
v	[m/s]	Rychlost řezání [m/s]
η	[-]	Součinitel účinnosti

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha číslo 1
Příloha číslo 2
Příloha číslo 3
Příloha číslo 4
Příloha číslo 5
Příloha číslo 6
Příloha číslo 7
Příloha číslo 8
Příloha číslo 9

SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1 Porovnání vybraných vlastností diodou čerpaných laserů	14
Tab. č. 2 Vlnové délky a výkony vybraných laserových diod	19
Tab. č. 3 Součinitele absorpce některých kovů	24
Tab. č. 4 Příklady volby délek pro měření Ra	36
Tab. č. 5 Parametry oceli X10CrNi18-8 (17 421)	40
Tab. č. 6 Parametry oceli DC 01 (11 321).....	41
Tab. č. 7 Parametry oceli S235 JRG (11 375).....	41
Tab. č. 8 Řezné parametry pro nerezovou ocel - tavný způsob řezání	42
Tab. č. 9 Řezné parametry pro ocele – oxidační způsob řezání	43
Tab. č. 10 Naměřené hodnoty Ra pro nerezovou ocel	45
Tab. č. 11 Naměřené hodnoty Rz5 pro nerezovou ocel	46
Tab. č. 12 Naměřené hodnoty Ra pro hlubokotažnou a konstrukční ocel.....	48
Tab. č. 13 Naměřené hodnoty Rz5 pro hlubokotažnou a konstrukční ocel.....	48

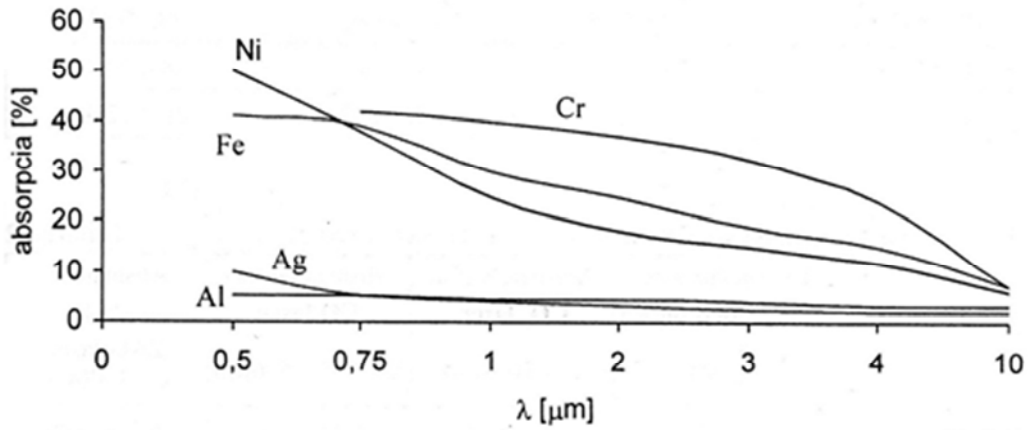
SEZNAM VZORCŮ

Vzorec č. 1.1 Energie z rozdílu energetických hladin.....	10
Vzorec č. 4.1 Součinitel odrazivosti.....	24
Vzorec č. 5.1 Množství vneseného tepla	28

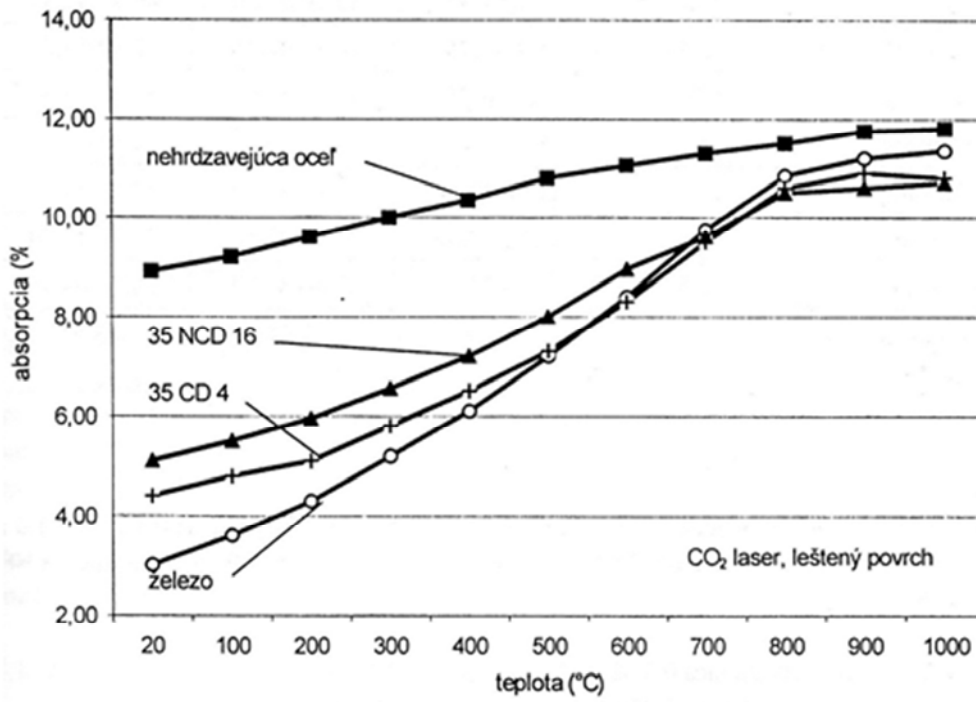
SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1	Ilustrativní obrázky laserového řezání.....	9
Obr. č. 2	Princip stimulované emise záření.....	10
Obr. č. 3	Zjednodušené schéma laseru.....	11
Obr. č. 4	TEM 00 - Gaussovo rozložení.....	12
Obr. č. 5	Příklad TEM jiného než Gaussovo.....	12
Obr. č. 6	Plynový laser s podélným prouděním.....	15
Obr. č. 7	SLAB CO ₂ laser.....	16
Obr. č. 8	Schéma Nd: YAG laseru.....	17
Obr. č. 9	Schéma diskového laseru.....	17
Obr. č. 10	Schéma vláknového laseru.....	18
Obr. č. 11	P-N přechod.....	18
Obr. č. 12	Stack laser.....	19
Obr. č. 13	Vrtání na jeden impuls; Vrtání nárazové.....	21
Obr. č. 14	Trepanační vrtání.....	21
Obr. č. 15	Spirálové vrtání.....	21
Obr. č. 16	Proces svařování laserem.....	22
Obr. č. 17	Prostorové řezání.....	23
Obr. č. 18	Řezání laserem.....	25
Obr. č. 19	Ohnisko - tavné řezání.....	25
Obr. č. 21	Řezy při různých řezných rychlostech.....	27
Obr. č. 22	Řezy při různých řezných výkonech laserového paprsku.....	28
Obr. č. 23	Střída frekvence.....	28
Obr. č. 24	Řezy s různými polohami ohniska.....	29
Obr. č. 25	Ohnisková vzdálenost.....	29
Obr. č. 26	Řez prováděný s různým nastavením tlaku plynu.....	30
Obr. č. 27	Vzdálenost trysky při řezání kyslíkem.....	30
Obr. č. 28	Vzdálenost trysky při řezání plynem.....	30
Obr. č. 29	Skluz.....	31
Obr. č. 30	Redukce do roviny řezu rovinou kolmou na povrch.....	33
Obr. č. 31	Popis jednotlivých délek.....	34
Obr. č. 32	Parametry Rp, Rv, Rz.....	34
Obr. č. 33	Znázornění hodnoty Ra.....	35
Obr. č. 34	Graf definovaný normou ČSN EN ISO 9013.....	38
Obr. č. 35	Laser YLS 2000.....	39
Obr. č. 36	Robot s řeznou hlavou.....	39
Obr. č. 37	Makro nerez tl 3 mm.....	40
Obr. č. 38	Makro tl 3 mm.....	40
Obr. č. 39	Makro tl. 4 mm.....	41
Obr. č. 40	Měřené vzorky.....	42
Obr. č. 41	Drsnoměr s posuvnou jednotkou.....	43
Obr. č. 42	Měření vzorku.....	44
Obr. č. 43	Vzorek při měření zblízka.....	44
Obr. č. 44	Označená měřící místa na vzorku.....	44
Obr. č. 45	Zpracované hodnoty Ra.....	46
Obr. č. 46	Zpracované hodnoty Rz5.....	47
Obr. č. 47	Zařazení do tříd přesnosti – nerez ocel.....	47
Obr. č. 48	Zpracované hodnoty Ra.....	49
Obr. č. 49	Zpracované hodnoty Rz5.....	49
Obr. č. 50	Zařazení do tříd přesnosti – uhlíkové oceli.....	50

Příloha číslo 1 [4]



Obr. 10 Porovnanie absorpcie rôznych materiálov v závislosti od vlnovej dĺžky žiarenia



Obr. 11 Absorpcia lešteného povrchu pri spracovaní CO₂ laserom ako funkcia teploty povrchu (v %)

Příloha číslo 2 [4]

Vplyv vlnovej dĺžky žiarenia na veľkosť absorpcie lešteného povrchu [24]

Tabuľka 1

Druh materiálu (leštený povrch)	Absorpcia (%) CO ₂ laser $\lambda = 10,6\mu\text{m}$	Absorpcia (%) CO laser $\lambda = 5,3 - 5,6\mu\text{m}$	Absorpcia (%) YAG laser $\lambda = 1,06\mu\text{m}$
Oceľ 35NCD16 ²	5,15-5,25	8,55-8,65	29,75-30
Oceľ 35CD4 ³	4,45-4,55	7,5-7,6	28,6-29,4
Titán	7,4-7,6	12,9-13,2	34,8-35,4

Vplyv stavu povrchu na koeficient absorpcie [24] ocele 35NCD16

Tabuľka 2

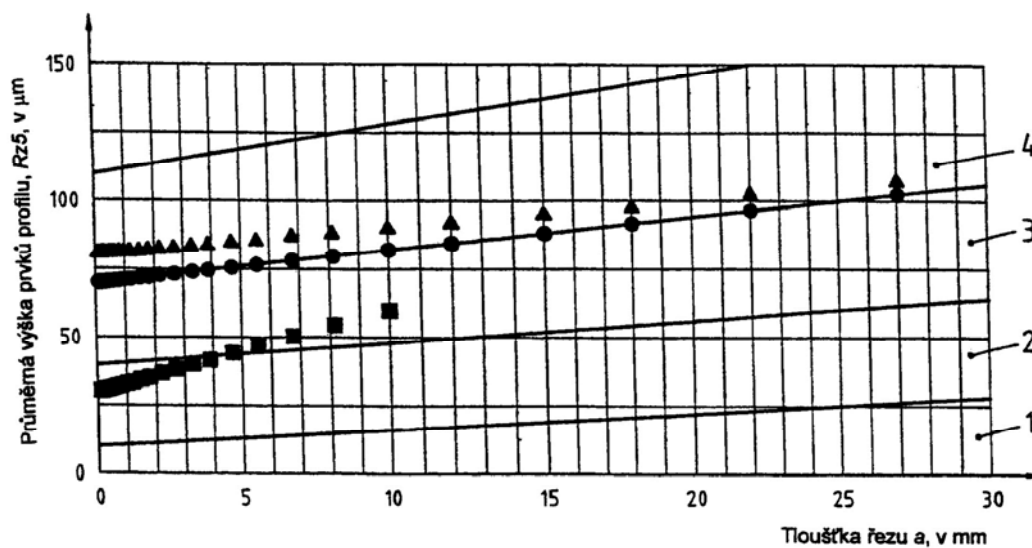
Stav povrchu	Priemerná drs- nosť povrchu Ra (μm)	Absorpcia (%) CO ₂ laser $\lambda = 10,6\mu\text{m}$	Absorpcia (%) CO laser $\lambda = 5,3 - 5,6\mu\text{m}$	Absorpcia (%) YAG laser $\lambda = 1,06\mu\text{m}$
Leštený	0,02	5,15-5,25	8,55-8,70	29,75-30,00
Brúsený	0,21	7,45-7,55	12,85-12,95	38,90-40,10
Brúsený	0,28	7,70-7,80	13,10-13,20	40,20-41,40
Valcovaný	0,87	5,95-6,05	10,15-10,35	33,80-34,20
Valcovaný	1,10	6,35-6,45	10,85-11,00	34,10-34,40
Valcovaný	2,05	8,10-8,25	13,50-13,70	41,80-42,50
Valcovaný	2,93	11,60-12,10	19,85-20,60	52,80-53,20
Valcovaný	3,35	12,55-12,65	21,35-21,50	51,40-51,70
Pieskovaný	1,65	33,85-34,30	42,40-42,80	68,20-68,40
Brúsený+koloid- ný grafit	-	74-76	77-78	88-92

² Francúzska oceľ obsahujúca 0,32 až 0,39 % C, 0,3 až 0,6 % Mn, 0,1 až 0,4 % Si, 1,6 až 2,2 % Cr, 3,6 až 4,1 % Ni, max 0,03 % P, max 0,025 % S a 0,25 až 0,45 % Mo (podľa NFA 35-552).

³ Francúzska oceľ obsahujúca 0,3 až 0,37 % C, 0,6 až 0,9 % Mn, 0,1 až 0,4 % Si, 0,85 až 1,15 % Cr, max 0,035 % P, max 0,035 % S a 0,15 až 0,3 % Mo (podľa NFA 35-553).

Příloha číslo 3 [6]

Typické dosažitelné hodnoty průměrné výšky profilu, Rz5 v závislosti na tloušťce zpracovaného kusu



Legenda

- Řezání kyslíkovým plamenem
- ▲ Plazmové řezání
- Řezání laserem

Průměrná výška prvků profilu, Rz5

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu, Rz5 [μm]
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 (1,8a \text{ mm})$

Příloha číslo 4

Laser použitý pro řezání vzorků YLS 2000 (PG PHOTONICS)

Vývod laserového paprsku
z laseru (optické vlákno)

Ovládací panel pro řízení
pohybu robota

Tlačítko
start

Centrální
stop



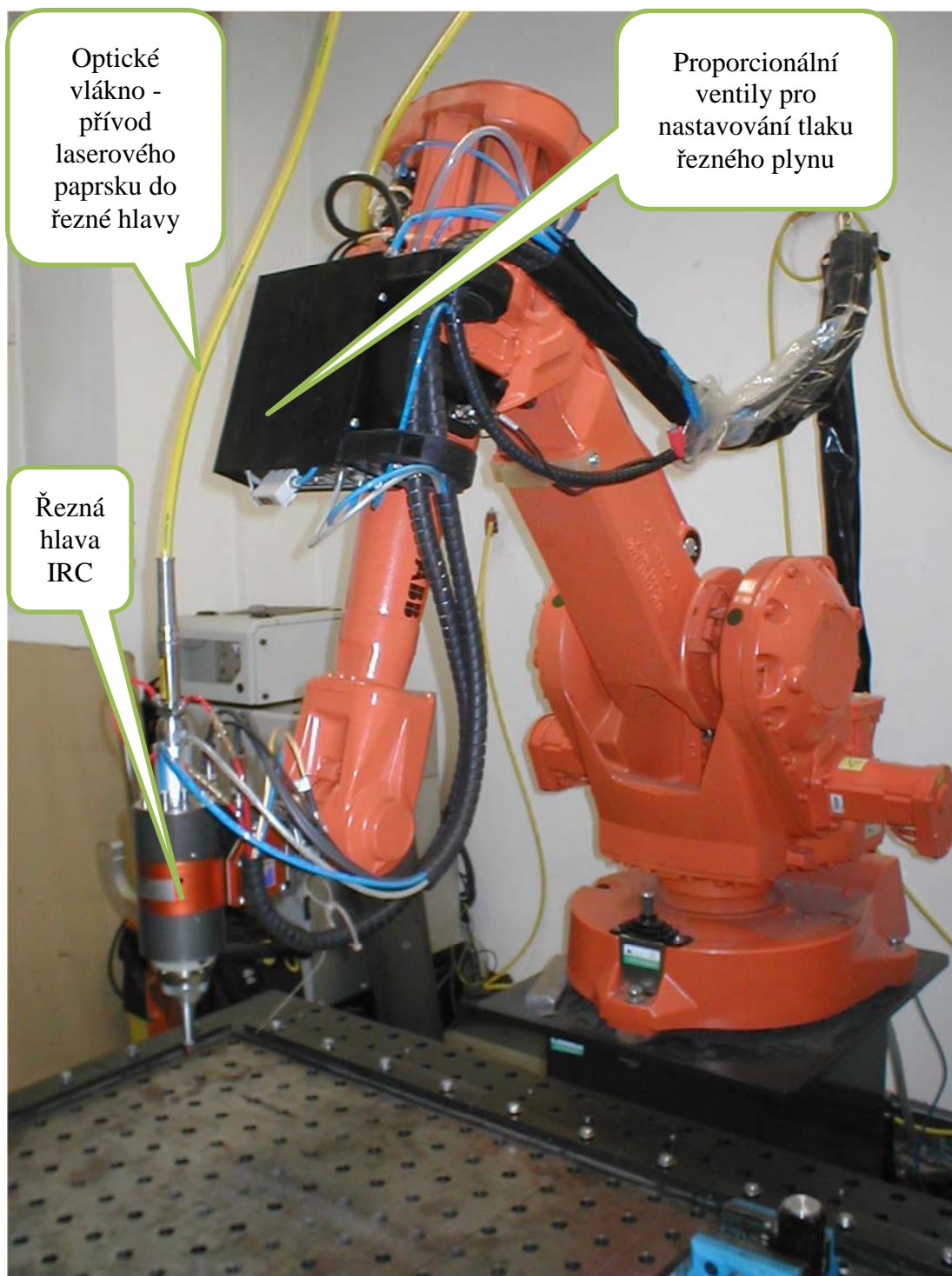
Příloha číslo 5

Řezná hlava YRC 100 (PRECITEC)



Příloha číslo 6

Robot, který nese řeznou hlavu IRB 2400 (ABB)



Příloha číslo 7 [38]



Příloha číslo 8 [26]



Makro řezné hrany měřeného vzorku z nerez oceli o tloušťce 0,8 mm



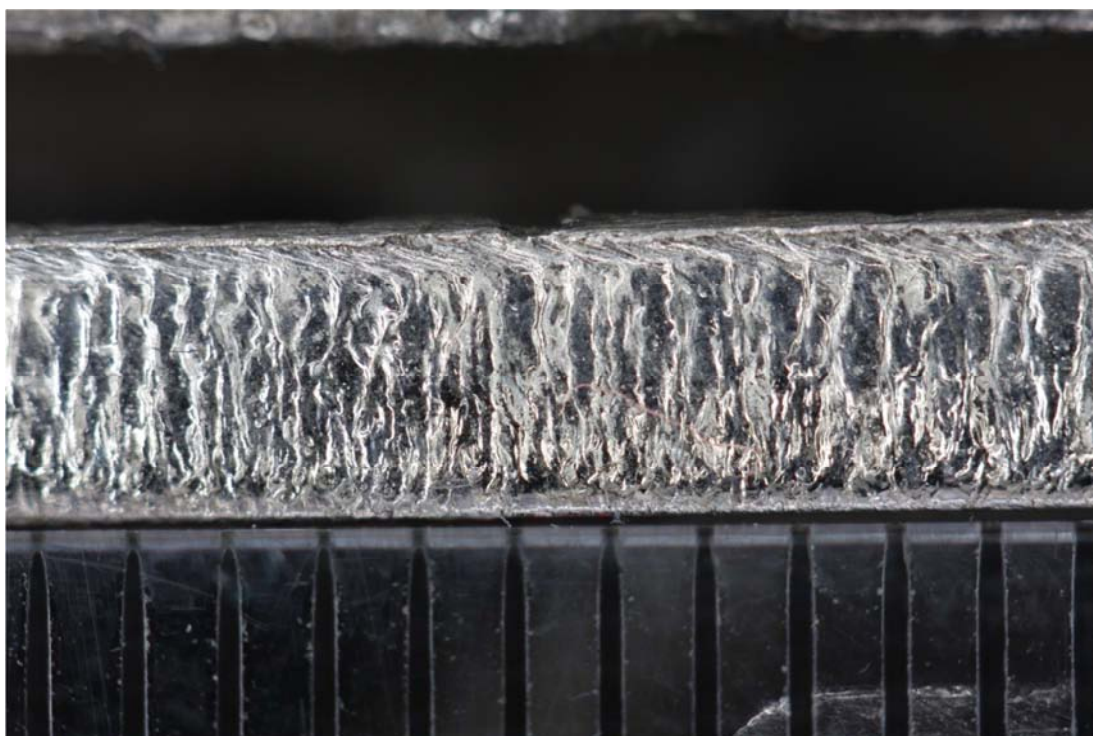
Makro řezné hrany měřeného vzorku z nerez oceli o tloušťce 1 mm



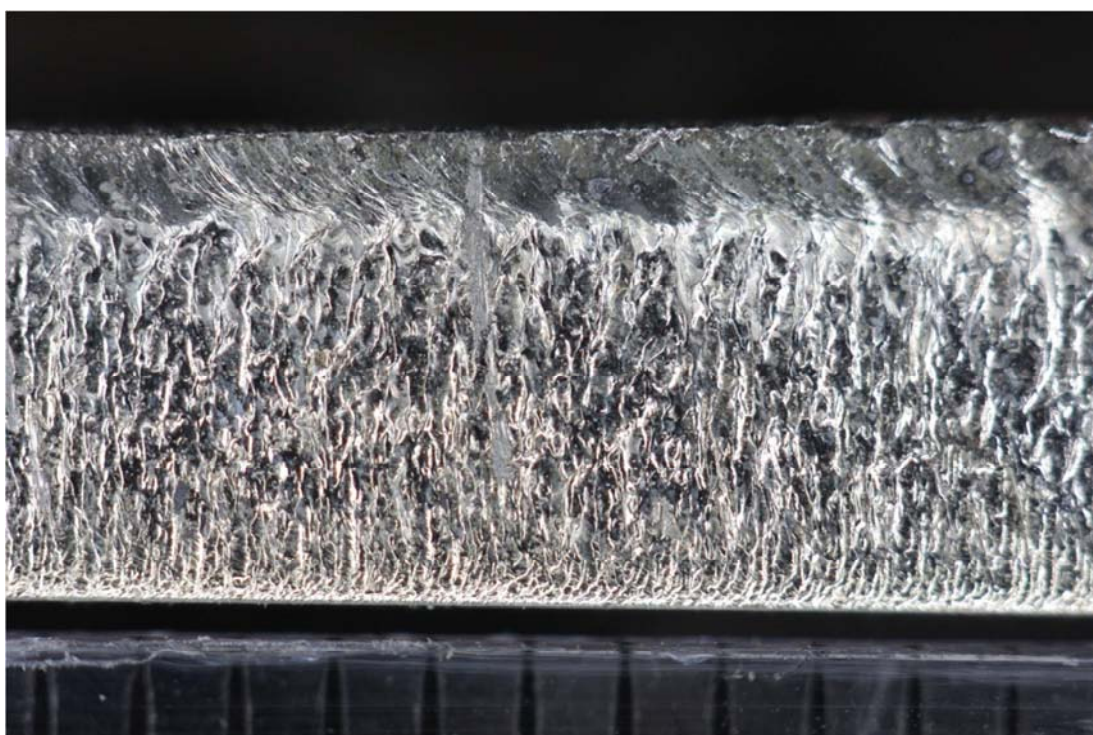
Makro řezné hrany měřeného vzorku z nerez oceli o tloušťce 1,5 mm



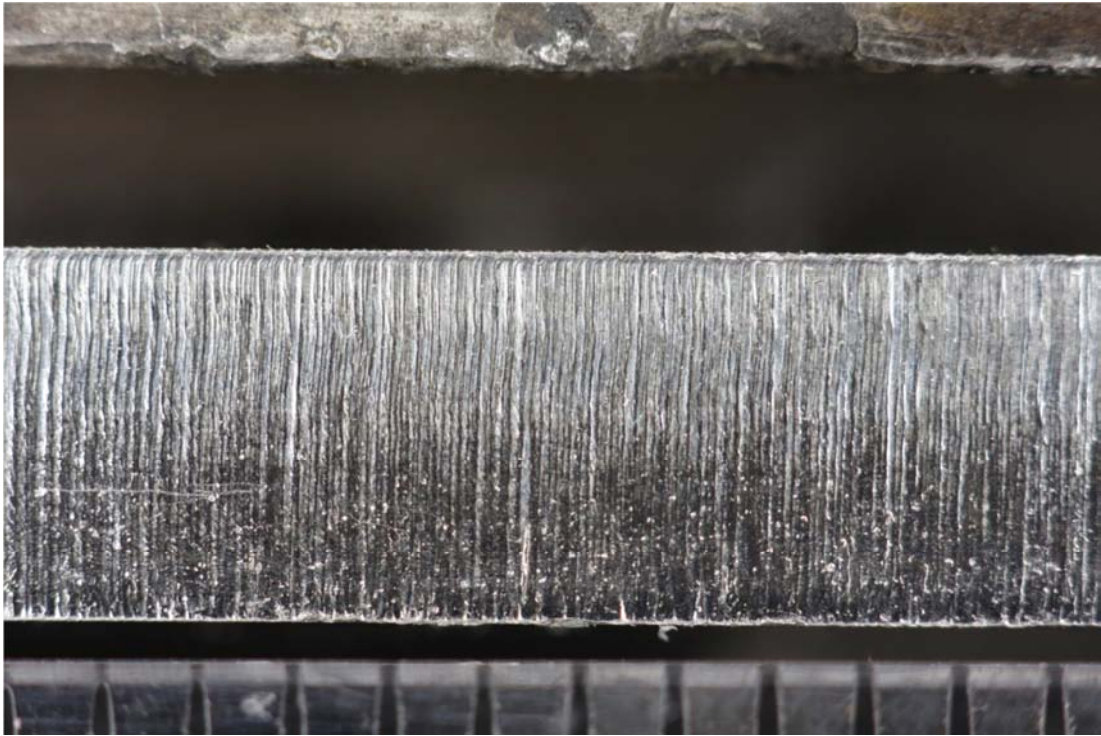
Makro řezné hrany měřeného vzorku z nerez oceli o tloušťce 2 mm



Makro řezné hrany měřeného vzorku z nerez oceli o tloušťce 3 mm



Makro řezné hrany měřeného vzorku z nerez oceli o tloušťce 4,8 mm



Makro řezné hrany pro ilustraci z nerez oceli o tloušťce 4 mm, při použití CO₂ jako řezného plynu

Příloha číslo 9 [26]



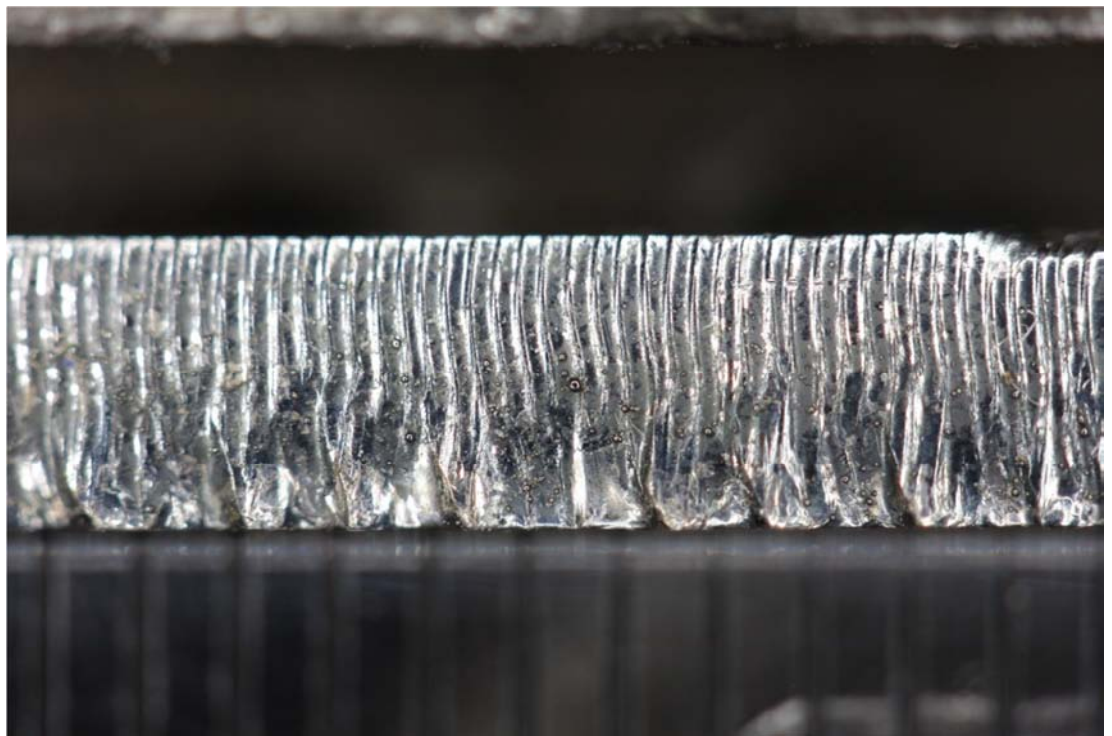
Makro řezné hrany měřeného vzorku z oceli DC 01 o tloušťce 1 mm



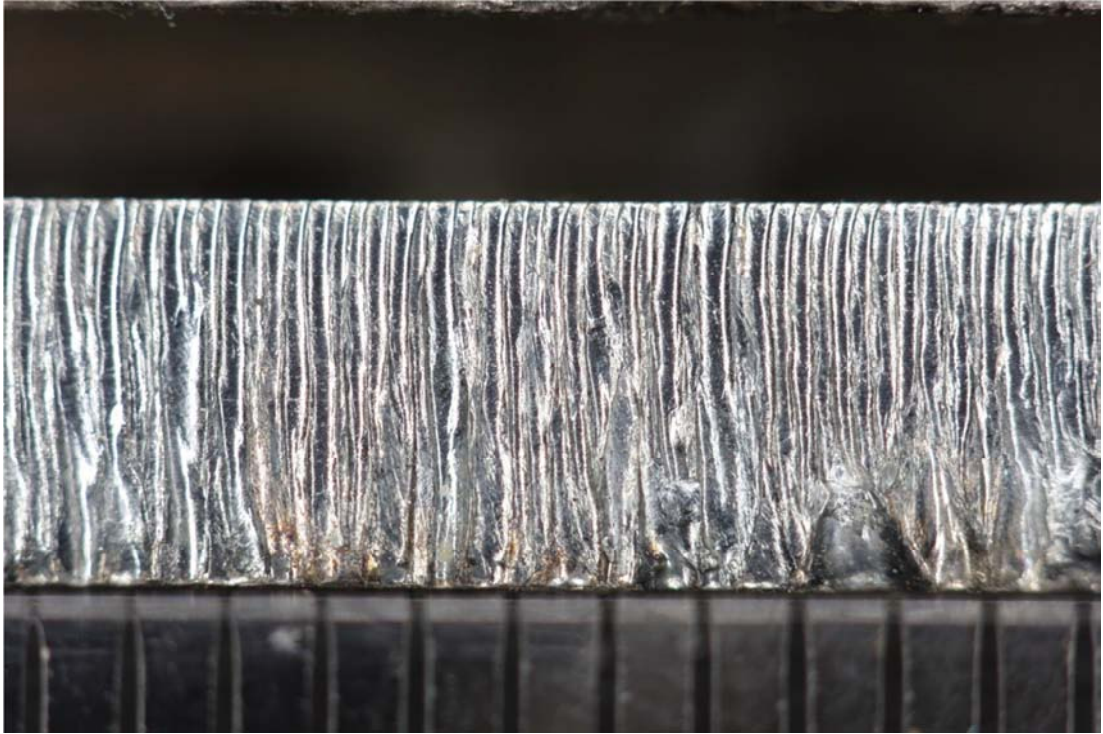
Makro řezné hrany měřeného vzorku z oceli DC 01 o tloušťce 1,5 mm



Makro řezné hrany měřeného vzorku z oceli DC 01 o tloušťce 2 mm



Makro řezné hrany měřeného vzorku z oceli DC 01 o tloušťce 3 mm



Makro řezné hrany měřeného vzorku z oceli S235 JRG o tloušťce 4 mm



Makro řezné hrany pro ilustraci z oceli S235 JRG o tloušťce 4 mm, při použití CO₂ jako řezného plynu