



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM KVALITY ŘEZU HLINÍKOVÝCH A CU SLITIN PŘI TAVNÉM ŘEZÁNÍ V ZÁVISLOSTI NA PROCESNÍCH PARAMETRECH PŘI LASEROVÉM DĚLENÍ S VYUŽITÍM YBYAG VLÁKNOVÉHO LASERU

STUDY OF QUALITY CUTTING EDGE OF ALUMINUM AND COPPER ALLOYS FOR FUSION CUTTING IN
DEPENDING ON THE PROCESS PARAMETERS DURING LASER CUTTING USING A FIBER YBYAG LASER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Edmund Pilarčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Edmund Pilarčík
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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

Studium kvality řezu hliníkových a Cu slitin při tavném řezání v závislosti na procesních parametrech při laserovém dělení s využitím YbYAG vláknového laseru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studium kvality řezné hrany z hlediska drsnosti a řezných vad u hliníkových a Cu slitin při tavném režimu řezání vláknovým laserem. Je nutné prozkoumat závislost kvality řezu na vstupních - procesních parametrech (výkon laseru, řezná rychlost, tlak dusíku, poloha ohniska, průměr spotu)

Cíle diplomové práce:

- Osvojení si strategie nastavování procesních parametrů pro dosažení kvalitního řezu.
- Osvojení metodiky měření drsnosti řezu kontaktním drsnoměrem.
- Orientace v legislativě kvality a vad při tepelném dělení materiálů.

Seznam literatury:

BENKO, Bernard, Peter FOLDEREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. Laserové technológie. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.

VRBOVÁ, Miroslava. Lasery a moderní optika - oborová encyklopedie. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1994, 474 s. ISBN 80-858-4956-9.

P. V. YDIN a kol.:Fundamental study of Co₂- and Fiber laser cutting of industrial materials with high speed visualization technique. konf. LANE 2014 Physics Procedia 56 (2014)

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

PILARČÍK Edmund: Studium kvality řezu hliníkových a Cu slitin při tavném řezání v závislosti na procesních parametrech při laserovém dělení s využitím YbYAG vláknového laseru.

Diplomová práce pojednává o laserovém řezání farebných kovů na vláknovém Yb:YAG laseru a vyhodnocování drsnosti vzorků rezných hran. Při zhotovení vzorků z hliníku Al 99,5, bezkyslíkaté mědi Cu – DHP a mosadze CuZn37 byly použity kombinace procesních parametrů podle Taguchiho statistické metody. Vzorky byly následně vyhodnoceny, na základě normy ČSN EN ISO 9013 zařazené do tříd drsnosti, a technicko – ekonomickým zhodnocením byly nalezeny nejekonomičtější kombinace rezných parametrů.

Praktické části předchází popis obecných metod dělení materiálu, popis typů laserových zařízení, procesních parametrů laserového dělení s následnými vadami a popis metodiky měření drsnosti a normy ČSN EN ISO 9013

Klíčové slova: YbYAG laser, drsnost povrchu, laserové řezání, farebné kovy

ABSTRACT

PILARČÍK Edmund: Study of the cutting edge quality of aluminium and Cu alloys after melt cutting depending on process parameters during laser cutting using the YbYAG fiber laser.

The diploma thesis discusses laser cutting of non-ferrous metals using fiber YbYag laser and evaluation of the roughness of cutting edge samples. To manufacture samples of aluminium Al 99,5, deoxidized copper Cu – DHP and brass CuZn37 were used combinations of process parameters according to Taguchi statistical method. Samples were subsequently evaluated, according to the ČSN EN ISO 9013 standard and sorted into roughness categories, and by technical and economical evaluation, the most economical process parameter combinations were found.

Experimental part is preceded by description of general methods of cutting, description of laser types, process parameters and their influence on the occurrence of the cutting edge defects and description of roughness measurement and standard ČSN EN ISO 9013.

Key words: YbYAG laser, surface roughness, laser cutting, non-ferrous metals

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

PILARČÍK, E. *Studium kvality řezu hliníkových a Cu slitin při tavném řezání v závislosti na procesních parametrech při laserovém dělení s využitím YbYAG vláknového laseru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 57 s. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Týmto prehlasujem, že predkladanú diplomovú prácu som vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho diplomovej práce.

V dne

.....

Podpis

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D za cenné pripomienky a rady týkajúce sa spracovania diplomovej práce. Takiež ďakujem firme HIWIN s.r.o za umožnenie spolupráce a poskytnutie materiálov a strojného času. V neposlednom rade ďakujem svojej rodine za podporu.

OBSAH

Zadanie

Abstrakt

Bibliografická citácia

Čestné prehlásenie

Podakovanie

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 METÓDY DELENIA MATERIÁLU	10
1.1 Trieskové delenie materiálu	10
1.2 Beztrieskové delenie materiálu	11
1.3 Teplné delenie materiálu	12
1.3.1 Delenie materiálu autogénovým plameňom	12
1.3.2 Delenie materiálu plazmovým oblúkom	13
1.3.2 Delenie materiálu zväzkom elektrónov	14
1.4 Rezanie materiálu vodným lúčom	15
1.5 Elektroerozívne rezanie	15
1.6 Rezanie ultrazvukom	16
1.7 Rezanie materiálu výbuchom	17
2 TYPY PRIEMYSELNÝCH LASEROV	18
2.1 Rozdelenie priemyselných laserov	18
2.1.1 Plynové lasery	18
2.1.2 Pevnolátkové lasery	20
2.1.3 Polovodičové lasery	23
3 PRINCÍP LASEROVÉHO REZANIA	24
3.1 Metódy laserového rezania	25
3.2 Parametre laserového rezania	25
3.2.1 Parametre laserového žiarenia	27
3.2.2 Parametre rezného procesu	28
3.2.3 Parametre materiálu	30
3.3 Vady rezných plôch	30
4 DRSNOSŤ REZNÝCH HRÁN	32
4.1 Meranie drsnosti	33
5 DRUHY REZANÝCH MATERIÁLOV	34
5.1 Hliník a jeho zliatiny	34
5.2 Med' a jej zliatiny	35
5 NORMA ČSN EN ISO 9013	36
7 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	38
7.1 Experimentálne laserové zariadenie FLC 0800	38

2.1.1 Rezná hlava HIGHYAG.....	39
7.2 Zisťovanie vplyvu rezných parametrov na kvalitu rezných plôch.....	40
7.2.1 Návrh tvaru vzorku.....	40
7.2.2 Taguchiho štatistické metódy.....	41
7.2.3 Metodika merania drsnosti.....	42
7.3 Tabuľky rezných parametrov a nameraných drsností.....	42
8 ZARADENIE NAMERANÝCH DRSNOSTÍ DO TRIED PODĽA NORMY ČSN EN ISO 9013	51
8.1 Zaradenie vzorkov mosadze do tried drsnosti.....	51
8.1 Zaradenie vzorkov hliníku do tried drsnosti.....	52
8.1 Zaradenie vzorkov medi do tried drsnosti.....	52
9 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE.....	54
9 ZÁVERY.....	57

Zoznam použitých zdrojov

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Zoznam obrázkov

Zoznam tabuliek

Zoznam príloh

Zoznam výkresov

ÚVOD [14], [20], [21], [26], [34], [39]

Existenciu stimulovanej emisie, ktorá patrí medzi základné princípy fungovania laseru, predpovedal, na základe termodynamických a štatistických úvah, už Albert Einstein v roku 1916. Od tých čias ušla laserová technológia dlhú cestu a získala silnú pozíciu najrôznejších odvetviach priemyslu od strojárstva a stavebníctva cez elektrotechniku až po medicínu, za čo vďačí svojej univerzálnosti a flexibilitnosti.

Laserové technológie v strojárnskej praxi ponúkajú širokú škálu uplatnenia od delenia materiálu, cez zváranie, povrchové kalenie, napalovanie, gravírovanie až po mikroobrábanie. V súčasnej dobe sú doteraz najpoužívanejšie CO₂ lasery vo firmách postupne vytlačované modernejšími pevnolátkovými lasermi, medzi ktoré patrí aj vláknový YbYAG laser, ktorý bude použitý v praktickej časti tejto práce. Táto nová generácia priemyslových pevnolátkových laserov so sebou prináša nové možnosti výroby, vyššie výkony, vysokú účinnosť a v porovnaní s CO₂ lasermi omnoho nižšie servisné a prevádzkové náklady.

Drsnosť rezných hrán patrí z hľadiska kvality k najdôležitejším kritériám hodnotenia kvality výrobkov zhotovených laserovým rezaním. Preto je nutné pred zavedením laserového zariadenia do prevádzky nájsť kombináciu parametrov, ktorej použitie v sebe kombinuje dosahovanie čo najvyššej kvality rezných hrán s vynaložením čo najnižších nákladov na prevádzku zariadenia.



Obr. 1 Ukážka laserového rezania a laserovej procesnej hlavy [21], [33]

1 METÓDY DELENIA MATERIÁLU [8], [10], [12], [22]

Delenie materiálu je činnosť, pri ktorej delíme základný kus materiálu na niekoľko menších kusov. V strojárstve slúži delenie materiálu ako základná operácia prípravy polotovaru na ďalší výrobný proces. Metódy delenia materiálu je možné rozdeliť do niekoľkých skupín. Podľa tvorby odpadu v priebehu deliacej operácie na trieskové a beztrieskové delenie a podľa teploty deliacej operácie na delenie za tepla a delenie za studena, ale taktiež na konvenčné a nekonvenčné spôsoby delenia.

V tejto kapitole budú rozobraté jednotlivé technológie trieskového a beztrieskového delenia materiálu, delenia za tepla aj za studena, ako aj nekonvenčné spôsoby delenia materiálu ako elektroerozívne rezanie, rezanie plazmou, vodným lúčom, a elektrónovým lúčom. Keďže laserové rezanie je pre túto prácu najpodstatnejšie, bude mu venovaná samostatná kapitola.

1.1 Trieskové delenie materiálu [10], [12], [18], [40]

Pri trieskovom delení materiálu vniká čepel deliaceho nástroja do materiálu deleného polotovaru, rozdeľuje ho na požadované časti pričom vzniká vedľajší odpadový produkt – trieska. Poznáme tri základné metódy trieskového delenia materiálu, a to rezanie, upichovanie a rozbrusovanie.

- **Rezanie**

Pri rezaní sa materiál oddeľuje pomocou jemnozubového nástroja akým je pílový list zhotovovaný prevažne z legovanej nástrojovej uhlíkovej alebo rýchloreznej oceli so zakalenými zubami, pričom množstvo odpadového materiálu závisí práve na šírke listu. Rezanie je možné vykonávať ručne aj strojne. V rámci ručného delenia poznáme rezanie ručnou rámcovou pilou a rezanie ručnou elektrickou pilou. Strojné rezanie sa koná na pásových rámcových a okružných pilách. Materiál môže byť delený len do určitej tvrdosti, inak je nutné, aby bol dopredu vyžíhaný. V rámci tejto technológie môže byť dosiahnutá presná hmotnosť deleného polotovaru, kolmosť rezu ako aj hladký rez.

- **Upichovanie**

Upichovanie sa vykonáva na univerzálnych sústruhoch alebo upichovacích automatoch. Pri upichovaní nedochádza k stlačeniu a je možné získať veľmi hladké plochy, vyrábajú sa pomocou neho polotovary s presnými rozmermi pre pretlačovanie. Keďže pri tomto spôsobe delenia dochádza k pomerne vysokým stratám materiálu, požíva sa dosť zriedkavo, a to najmä v kusovej výrobe.

- **Rozbrusovanie**

Pri rozbrusovaní je k oddeleniu kusov použitý abrazívny účinok vyvolaný relatívnym pohybom plôch deleného materiálu a plochy rozbrusovacieho nástroja, ktorým je tenký rezný kotúč, zhotovený z karbidu kremíku (SiC) alebo zo syntetického korundu (Al_2O_3). Jedná sa o široko využívanú metódu delenia vhodnú pre všetky druhy ocelí, liatin aj nekovových materiálov. Nevýhodou je energetická náročnosť, veľká tepelne ovplyvnená oblasť, deformácia materiálu v mieste rezu ako aj vysoké straty materiálu.

1.2 Beztrieskové delenie materiálu [10], [22], [40], [45]

Pri beztrieskovom (tvárnom) delení materiálu dochádza k oddeleniu materiálu pôsobením vonkajších síl bez odobrania triesky. Základným princípom je vznik plastických deformácií, ku ktorým dôjde pri dosiahnutí napätia na medzi klzu daného materiálu. Poznáme tri základné spôsoby tvárneho delenia materiálu, a to sú delenie strihaním, sekaním a vysekávaním a delenie lámaním.

- **Strihanie**

Strihanie materiálu sa vykonáva ako za studena tak aj za tepla. Jedná sa o beztrieskové delenie materiálu medzi dvoma nožmi, ktoré sa pohybujú proti sebe. Oba nože vnikajú do materiálu súčasne. Materiál je nožmi najprv stlačovaný, následne dochádza k jeho oddeleniu. Pre správne fungovanie procesu je nutné aby sa oba nože v mieste strihu tesne dotýkali. Tento spôsob delenia je lacnejší ako trieskový, keďže nedochádza k strate materiálu, ale nedosahuje kvalitu plôch a presnosť rozmerov aké sa dosahujú pri trieskovom delení. Delenie materiálu strihaním môžeme ďalej rozdeliť na strihanie plechov, strihanie tyčí a sochorov a strihanie profilov a trubiek.

- **Pri strihaní plechov** je strihaným materiálom plech, ktorý sa vsunie medzi strižník a strižnicu. K porušeniu materiálu a vytvoreniu strižnej plochy dôjde keď strižník pôsobí silou na strihaný plech. Kvalita strižnej plochy závisí na vlastnostiach strihaného materiálu rovnako ako na podmienkach ktoré je nutné pri strihaní dodržať. Medzi tieto podmienky patrí ostrosť nožov, dodržanie strižnej medzery medzi nožmi, tvar a geometria strižných hrán a rýchlosť strihacieho procesu. Pre dosiahnutie kvalitnej strižnej plochy je zásadná veľkosť stanovenej strižnej medzery. Jej správnu voľbou sa zaistí spojenie trhlín, ktoré vzniknú v priebehu procesu a umožní použitie čo najnižšej strižnej sily.
- **Na strihanie tyčových polotovarov** sa v praxi najčastejšie používa objemové strihanie za studena. Strihaná tyč sa najprv upevní medzi pevné nože a následne na ňu začne pohyblivý nôž pôsobiť tlakovou silou. Po tom, čo sa pohyblivý nôž zatlačí do určitej, pre daný materiál charakteristickej, hĺbky, dôjde v materiálu k vzniku trhlín pod čepelami nožov. Tieto trhliny sa ďalším zanorovaním nožov širia materiálom, až kým nedôjde k odstrihnutiu..
- **Pri strihaní tenkostenných profilov a trubiek** je pohyblivý nôž vtlačovaný do strihaného materiálu, čím nastáva plastická deformácia, materiálom sa začnú širiť trhliny, ktoré keď sa stretnú dôjde k oddeleniu materiálu. Deformácii tvaru trubiek pri strihu je možné zabrániť použitím trňov, ktoré sa do nich vsunú. Na delenie trubiek a tenkostenných profilov sa používajú nožnice s kotúčovými nožmi

- **Sekanie a vysekávanie**

Jedná sa o technológiu určenú na dierovanie, prerážanie a tvárnenie rôznych uzavretých otvorov a tvarov z tabúl plechu pomocou špeciálnych nástrojov – razníkov oproti matici zhodnej s požadovaným tvarom výstrižku. Táto technológia je obzvlášť vhodná pre veľkosériovú výrobu. V dnešnej dobe sa pre maximálnu produktivitu technológia vysekávania kombinuje s technológiou laserového rezanie, pričom využíva výhod oboch technológií, reznú rýchlosť laseru a rozmerovú presnosť vysekávania vnútorných dier.

Medzi takto kombinované obrábacie centrá patrí aj TruMatic 3000 fiber, kombinujúci vysekávanie s laserovým rezaním a zvaraním (obr.2).



Obr. 2 Trumpf TruMatic 3000 Fiber [45]

- **Lámanie**

Lámanie sa využíva najmä na výrobu polotovarov pre tvárnenie za tepla. Vykonáva sa na špeciálnych lámacích strojoch, pričom miesto lomu na polotovare sa pred samotným lámaním nahrieva kyslíkoacetylenovým plameňom. To má za následok vytvorenie vrubu, čím dôjde k zmenšeniu plochy prierezu. Lámaním nie je možné deliť mäkké materiály s medzou pevnosti nižšou ako 600 MPa, keďže by nedošlo k vytvoreniu trhlín a materiál by sa jednoducho ohol. Medzi hlavné nevýhody tejto technológie delenia materiálu patrí nízka kvalita lomovej plochy a riziko vzniku trhlín a ich následného šírenia do materiálu.

1.3 Tepelné delenie materiálu [10], [32], [33], [44]

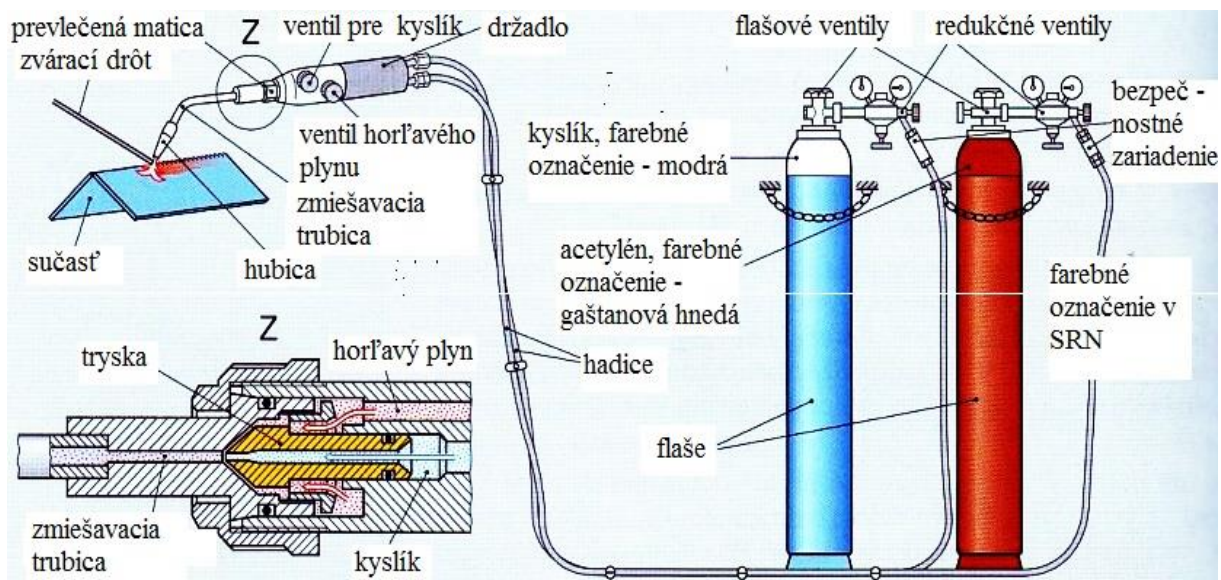
Pod pojmom tepelné delenie materiálu rozumieme technológiu rezania, ktorá pracuje na princípe lokálneho natavenia, spaľovania a odparovania materiálu. Namiesto triesky vzniká odpadový materiál – struska. Energia potrebná na vyvolanie tohto javu je dodávaná rôznymi tepelnými zdrojmi ako sú laser, plazma, plameň. Tepelne možno deliť širokú škálu materiálov od konštrukčných ocelí a zliatin cez neželezné kovy a ich zliatiny, ako meď a hliník, až po vysoko reaktívne materiály a nekovové materiály. V tejto kapitole budú opísané rozličné spôsoby tepelného delenia materiálu ako rezanie autogénom, plazmou, a zväzkom elektrónov.

1.3.1 Rezanie materiálu autogénnym plameňom [29],[37]

Jedná sa o tavný spôsob delenia materiálu. Princíp rezania kyslíko-acetylenovým plameňom spočíva v ohriatí materiálu na teplotu jeho spaľovania v prúde čistého kyslíka pri teplotách pod bodom tavenia, bez toho aby došlo k roztaveniu kovu. Materiál sa predhrieva na zápalnú teplotu (cca 1100°C), následne sa pridá prúd kyslíku spolu so znižujúcou sa dávkou horľavej zložky plynu na predhriate miesto, ktorý spôsobí spaľovanie materiálu. Pri spaľovaní vzniká teplo, ktoré ďalej zahrieva miesto rezu do hĺbky materiálu a vzniká tak tepelne ovplyvnená oblasť materiálu. Odpadový materiál, struska, je prúdom kyslíku vyfúknutý preč z miesta rezu. Pomalým pohybom horáku takto vzniká v požadovanom smere úzka rezná medzera. Produktom spaľovania je struska a oxidy. Plynová zmes je tvorená oxidačnou zložkou (kyslík) a horľavou zložkou (acetylen).

Autogénové rezanie umožňuje rezať materiál na náročne dosiahnuteľných miestach a v ľubovoľnej pozícii. Jedná sa o pomerne lacný spôsob rezania, ktorý ale umožňuje rezať

iba oceľ, pri rezaní vzniká široká tepelne ovplyvnená oblasť a rezné hrany majú nekvalitný povrch. Princíp rezania materiálu autogénym plameňom je zobrazený na obrázku 2.

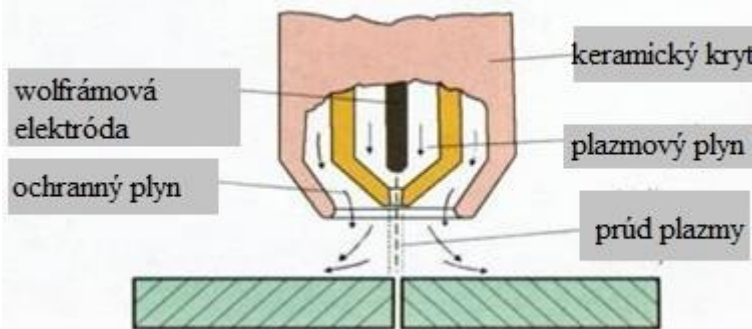


Obr. 3 Princíp rezania autogénom [37]

1.3.2 Delenie materiálu plazmovým oblúkom [20],[32], [35], [36], [38]

Plazma je vysoko vodivý plyn zložený z iónov, elektrónov a neutrálnych častíc. Plazmový oblúk sa používa na delenie ocele a ďalších kovových materiálov rôznych hrúbok pomocou plazmového horáka. V tomto procese je inertný plyn vháňaný vysokou rýchlosťou cez dýzu von z trysky, kde sa vysokonapäťovou iskrou zapáli elektrický oblúk, čím plyn ionizuje a uzatvorí elektrický obvod s povrchom rezaného materiálu. Vtedy sa vytvorí plazmový oblúk vysokej teploty, ktorý je dostatočne horúci na roztavenie rezaného kovu a pohybuje sa dostatočne rýchlo na oddelenie roztaveného kovu rezom. Plyn prúdiaci vysokou rýchlosťou zároveň odstráni roztavený prebytočný materiál z reznej medzery.

Zariadenie na rezanie plazmou je tvorené elektrickým zdrojom, riadiacou jednotkou, plazmovým horákom a manipulačným zariadením. V plazmovom horáku sa elektrická energia



Obr. 4 Konštrukcia plazmového horáka [35]

premieňa na tepelnú energiu usmerneného prúdu plazmy, preto je dôležitá stabilizácia elektrického oblúku. Podľa spôsobu, akým je u jednotlivých horákov elektrický oblúk stabilizovaný ich delíme na horáky s plynovou stabilizáciou a horáky s vodnou stabilizáciou. Konštrukcia plazmového horáku je znázornená na obrázku 4.

Plazmové technológie využívajú plyny plazmové, fokusačné a asistenté. Plazmové plyny sa privádzajú priamo do elektrického oblúku, kde ionizujú. Používa sa najmä argón, kyslík, dusík, vodík, aj vzduch. Fokusačné plyny slúžia na zaostrenie lúču plazmy do výstupného otvoru trysky horáku. Používajú sa argón, dusík a zmesi argónu s vodíkom a argónu s dusíkom. Asistenté plyny, argón a dusík, slúžia na ochranu plazmového lúča a miesta rezu

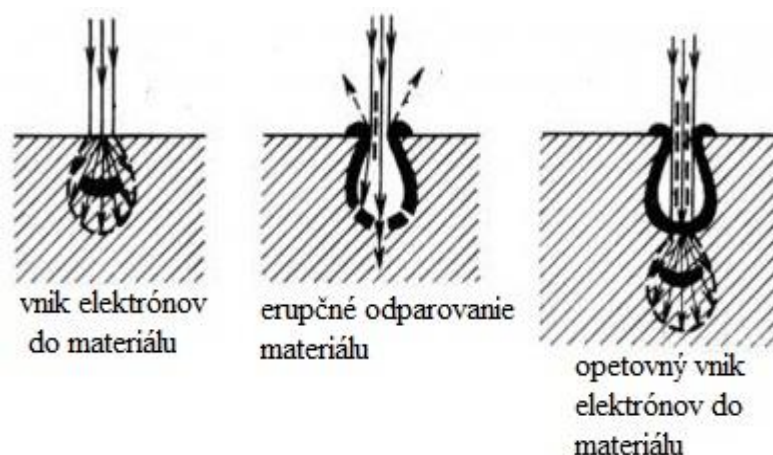
pred negatívnymi účinkami atmosféry. Tieto plyny sa volia na základe typu a hrúbky rezaného materiálu.

Medzi výhody rezania plazmou patrí presnosť a mobilita zariadenia a jeho relatívna cenová dostupnosť a nízke prevádzkové náklady, taktiež vysoká rýchlosť technologického procesu.

Hlavnými nevýhodami sú nižšia kvalita povrchu rezu a obmedzená hĺbka rezania, do hrúbky 150 mm. Pre rezanie hrubších materiálov je delenie plazmou neekonomické. Taktiež je nutné odsávanie spalín v priebehu procesu, takže musia byť požitie odsávacie a filtrovacie zariadenia.

1.3.3 Delenie materiálu zväzkom elektrónov [28],[31]

Technológia delenia materiálu zväzkom elektrónov využíva kinetickú energiu urýchleného prúdu elektrónov. Prúd urýchlených a zaostrych elektrónov dopadá na materiál, kde sa časť elektrónov odrazí (tzv. primárne elektróny), narazia do ďalších elektrónov, ktoré vyrazia do priestoru nad povrchom materiálu (sekundárne elektróny) a časť elektrónov vďaka svojej vysokej kinetickej energii prenikne hlboko do materiálu. Práve kvôli tomuto voľnému pohybu elektrónov je nutné rezanie vykonávať vo vákuu. Teplo vzniká, keď elektrón začne pri zrážkach s časticami materiálu brzdiť a jeho kinetická energia sa mení na tepelnú. Tepelná energia sa koncentruje pod povrchom materiálu v dôsledku čoho sa materiál začne erupčne odparovať.



Obr. 5 Princíp rezania elektrónovým lúčom [31]

Odparením materiálu vzniknú zionizované pary, ktoré znova zaostrí elektrónový lúč. Na hĺbku vzniknutej dutiny majú vplyv najmä rýchlosť posuvu, rýchlosť elektrónov a vlastnosti rezaného materiálu. Princíp rezania elektrónovým lúčom je znázornený na obrázku 5.

Zariadenie na rezanie elektrónovým lúčom sa skladá z elektromagnetického dela, elektromagnetického zaostracieho systému, systému na vychyľovanie lúča, napájacieho generátora a vákuovej pracovnej komory.

V praxi je elektrónový lúč využívaný predovšetkým na zvarovanie, pájanie a vŕtanie hlbokých dier s malými priermi. Pri rezaní a tepelnom spracovaní je táto technológia nahradená využitím laserov.

1.4 Rezanie materiálu vodným lúčom [14], [17], [36], [47]

Fyzikálna podstata rezania vodným lúčom spočíva v úvahe, že lúč kvapaliny ktorý sa pohybuje dvojnásobnou až štvornásobnou rýchlosťou zvuku možno z hľadiska jeho účinkov považovať za pevné teleso. K dosiahnutiu tejto rýchlosti prúdenia vodného lúča sa používa vysokotlaková pumpa, ktoré umožní vodu stlačiť na 400 MPa. Aby bolo možné lepšie rezať materiály s vysokou pevnosťou, veľmi mäkké, krehké alebo húževnaté materiály, pridáva sa do prúdu vody v zmiešavacej komore abrazívny materiál vo forme zrn. Používajú sa syntetické aj prírodné materiály ako korund, granát, SiC, kremičitý piesok a iné. Voda následne pokračuje do rezacej dýzy, ktorá vytvára rezací lúč o priemere 0,5 až 0,7 mm. Kvalitu a výkon rezania ovplyvňuje tvar dýzy, ktorej priemer ovplyvňuje východiskový tvar pracovného povrchu vysokorýchlostného abrazívneho prúdu ktorý sa vytvára v zmiešavacej trubici. Konštrukcia trysky pre rezanie vodným lúčom je znázornená na obrázku 6.

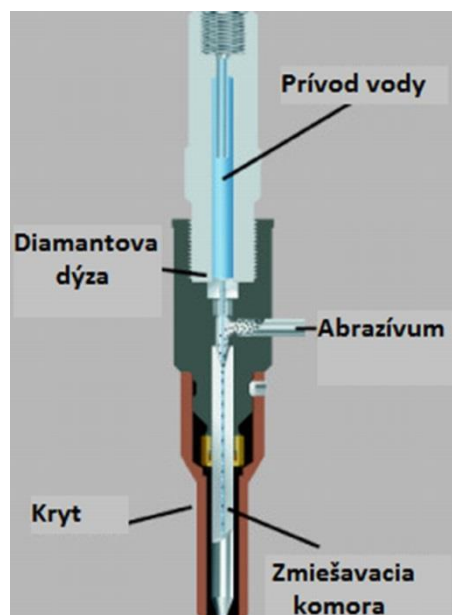
Samotný proces rezania začína pôsobením tlaku kvapaliny na materiál, čím sa vytvorí priehlbina, ktorá sa zmení na otvor. Následne sa otvor začne prehlbovať a vytvárať reznú medzeru.

Vodným lúčom je možné rezať veľmi širokú škálu materiálov. Bez prídavného abrazíva možno rezať mäkké materiály, plastické látky, polykarbonáty, vystužené polyméry. Pri rezaní materiálov o vysokej tvrdosti ako vysokopevnostné ocele, keramika, betón alebo sklo je nutné použitie abrazíva.

Rezanie vodným lúčom má mnoho výhod. Nedochoádza

pri ňom k dotyku nástroja a obrobku, materiál nie je tepelne namáhaný a nedochádza k vzniku vnútorného pnutia. Dosiahnuté rezné hrany sú obvykle vysokej presnosti, bez otrepov a nevyžadujú ďalšie opracovanie.

Nevýhodami procesu sú vysoká cena, nižšia rezná rýchlosť, malá životnosť trúbiek a hlučnosť procesu.



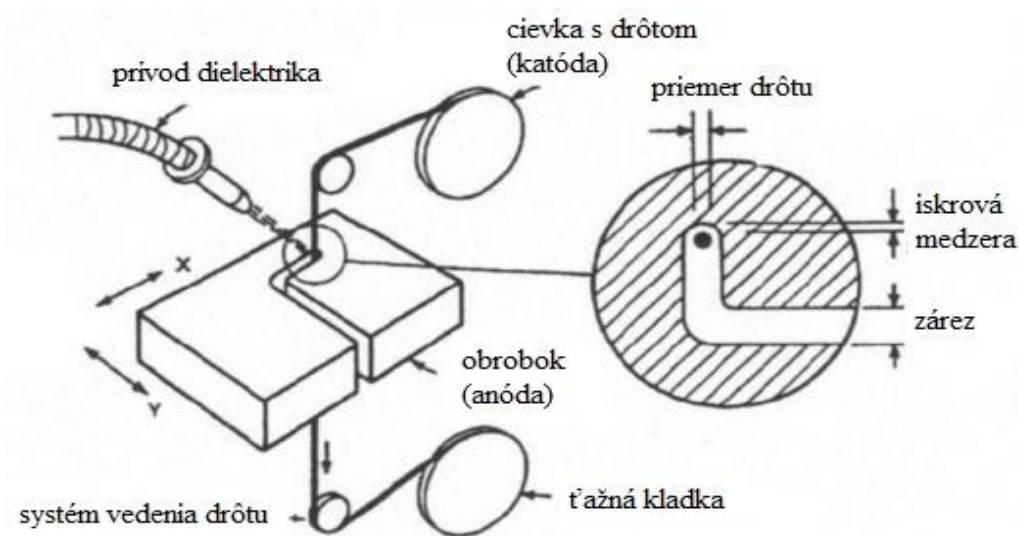
Obr. 6 Rezanie vodným lúčom [17]

1.5 Elektroerozívne rezanie [1], [9], [31], [36]

Princípom metódy elektroerozívneho obrábania je odoberanie materiálu elektrickými výbojmi, ku ktorým dochádza medzi katódou a anódou ponorenými v dielektrickej kvapaline, ktorá uľahčuje tok elektrických výbojov v iskrovej medzere. Materiál sa v dôsledku vysokej prúdovej hustoty natavuje a prúdom dielektrickej kvapaliny je z miesta rezu odstraňovaný. Pri rezaní drôtom je obrobok ponorený do kade s dielektrikom. Rez prebieha pomocou úzkeho drôtu, ktorý sa vyrába zväčša z medi.

. Medzi dvoma elektródami (nástroj a obrobok) v dielektrickej kvapaline prebieha preskok elektrického výboja, ktorý nataví povrch oboch elektród.

Aby v oblasti medzi elektródami preskočila iskra je nutné, aby bolo prekročené zapalovacie napätie uvedené v iskrovej medzere. Toto závisí od vzdialenosti elektródy od obrobku, izolačnej schopnosti dielektrika a znečistenia dielektrika v oblasti iskrovej medzery. V iskrovej medzere, vplyvom elektrického poľa pozitívne voľné ióny a elektróny získajú vysokú rýchlosť, čím sa vytvorí ionizačné vodivé prostredie.



Obr. 7 Princíp elektroerozívneho rezníe [9]

Následne sa zapáli elektrická iskra a tečúci prúd spôsobí veľký počet zrážok medzi čiastočkami dielektrika. Tým vznikne expanzná plazmatická zóna, dosahujúca 8000 až 12000°C, ktorá nataví povrchy oboch elektród. Dielektrikum spolu s materiálom elektród sa začne odparovať a vznikne plynová bublina. Potom sa horenie elektrickej iskry preruší, teplota prudko klesne a plynová bublina imploduje a vymrští roztavený materiál z kráteru na povrchu elektród, ktorý následne stuhne v dielektriku a je ním odplavený. Princíp elektroerozívneho rezníe je znázornený na obrázku č.7.

Táto technológia je vhodná na obrábanie tvrdých kovov a legovaných ocelí, ktoré kladú konvenčným spôsobom obrábania vysoký odpor.

1.6 Rezníe ultrazvukom [3], [4], [5]

Ultrazvukové technológie využívajú mechanické kmitanie o vysokej frekvencii, ktorých zdrojom je ultrazvukový menič, kmitanie je následne prenášané vlnovodom na sonotródu, ktorá je v priamom kontakte s materiálom. Príklady rôznych druhov sonotród sú zobrazené na obr. 8. V strojárskkej praxi sa aktívny ultrazvuk využíva na zatlačanie (implantovanie kovových dielov do plastov), čistenie, rezníe a zváranie.

Ultrazvukové rezníe sa využíva na rezníe ťažko deliteľných materiálov ako kevlarové materiály, alebo materiálov, ktoré sú mäkké a lepkavé, ako napríklad ne vulkanizovaná guma, ale taktiež nachádza využitie aj v potravinárskom priemysle (rezníe syrov, pečiva, zákuskov). Mikropohyb v osovom smere, ktorý je superponovaný na titánové nože, redukuje potrebnú reznú silu až o 75%, pričom zabezpečuje samočistenie noža.

K výhodám ultrazvukového rezníe patrí čistý rez, u predpätých a pletených materiálov



Obr. 8 Rôzne druhy sonotród

nedochádza k ich rozleptaniu, spotrebuje o mnoho menej energie ako napríklad výhrevné nože a sila potrebná na ultrazvukové rezanie je podstatne nižšia ako pri iných technológiách.

1.7 Delenie materiálu výbuchom [15], [36]

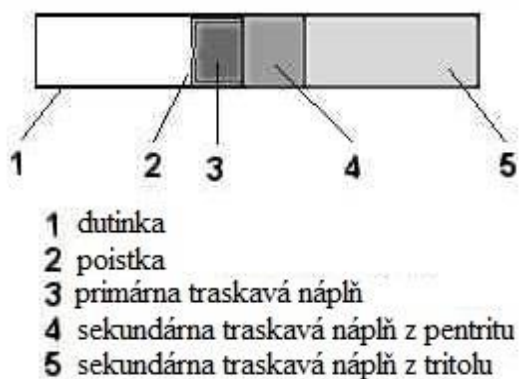
Delenie materiálu výbuchom využíva kinetickú energiu, ktorej zdrojom je výbušnina. Výbušnina je látka schopná extrémne rýchleho horenia. V mieste horenia vzniká vysoký tlak expanziou reakčných spalín v malom priestore, čím sa tepelná energia zmení na mechanickú.

Bežné výbušniny dokážu vydať teplo približne 4000 [kJ/kg] v priebehu reakčného času 10^{-3} až 10^{-4} sekúnd, čím dosahujú výkon 10^7 až 10^8 [kW/kg].

Poznáme tri základné druhy výbuchov: výbuchové horenie, výbuch a detonáciu.

- **Výbuchové horenie** je relatívne pomaly prebiehajúcou reakciou, jeho rýchlosť nepresahuje 1 [m/s]. Preto pri ňom nedochádza k zvýšeniu tlaku. Rýchlosť horenia, a teda aj dosiahnutý tlak, možno zväčšiť tak, že reakcia bude umiestnená do uzavretého priestoru.
- **Výbuch** dosahuje o mnoho vyššie tlaky ako výbuchové horenie. Rýchlosť horenia výbuchu dosahuje až 10^3 [m/s]
- **Detonácia** dosahuje rýchlosť horenia vyššiu ako je rýchlosť zvuku v materiáli, v ktorom prebieha. Táto rýchlosť nie je závislá na okolitom tlaku a teplote.

Samotné výbušniny sa delia na trhaviny, streliviny a traskaviny, pričom u trhavín je prevláda detonácia. Pre iniciáciu explózie je potrebná výbušniny je potrebná rozbuška. Medzi najčastejšie používané trhaviny patrí Semtex (obr. 10) a TNT. Na obr. 9 je znázornená konštrukcia rozbušky.



Obr. 9 Schéma rozbušky [36]



Obr. 10 Trhavina SEMTEX [36]

2 TYPY PRIEMYSELNÝCH LASEROV [14], [15], [26], [39]

V tejto kapitole sú popísané jednotlivé typy priemyselných laserov a ich uplatnenie, princíp a ich rozdelenie do podskupín podľa spôsobu čerpania energie a druhu aktívneho prostredia .

2.1 Rozdelenie priemyselných laserov [15], [39], [46]

Aj keď základný princíp laseru sa nemení, odlišnosťami v konštrukcii a spôsobom realizácie jednotlivých súčastí laserového zariadenia, môžeme rozlíšiť niekoľko základných typov laserov.

- Podľa spôsobu čerpania energie
 - optické lasery
 - lasery budené elektrickým výbojom
 - lasery budené chemickou reakciou
 - lasery budené elektrónovým lúčom
- Podľa druhu aktívneho prostredia
 - plynové lasery
 - pevnolátkové lasery
 - tyčové
 - vláknové
 - diskové
 - kvapalinové lasery
 - polovodičové lasery

Ďalej môžeme lasery rozlíšiť pomocou pracovného režimu na kontinuálne a pluzné, alebo podľa vlnovej dĺžky žiarenia, ktoré vydávajú, na infračervené, ultrafialové alebo röntgenové. Z hľadiska strojárnej praxe je najpoužívanejšie delenie podľa druhu aktívneho prostredia laseru. V tejto kapitole budú popísané lasery s pevnolátkovým a plyným aktívnym prostredím. Kvapalinové lasery, ktoré sú využívané najmä v informačnej technike a spektrometrii, popísané nebudú, nakoľko nie sú vhodné na rezanie materiálov.

2.1.1 Plynové lasery [15], [19], [30], [39]

Ako už názov skupiny napovedá, aktívne prostredie laseru tvoria plyny. Používané plyny sú tvorené atómami, iontami alebo molekulami, prípadne ich zmesou. Najčastejšie je u nich využívané budenie elektrickým výbojom alebo chemickou reakciou. Žiarenie ktoré tieto lasery emitujú závisí od použitého plynu a jeho vlnová dĺžka sa môže pohybovať od ultrafialového žiarenia cez infračervené žiarenie až po submilimetrové žiarenie.

V strojárnej praxi sa na rezanie materiálov používa iba CO₂ laser a na vrtanie malých otvorov a mikroobrábanie je možné použiť excitomerný laser. V súčasnosti sú však CO₂ lasery postupne vytlačované modernejšími pevnolátkovými lasermi, ktoré sú schopné pracovať pri nižších finančných nákladoch a s porovnateľným výkonom.

- **Plynový CO₂ laser**

Aktívne prostredie CO₂ laseru je tvorené plynou zmesou, zloženou z hélia, dusíku a oxidu uhličitého. Pomer plynov môže byť rôzny, no v praxi najpoužívanejšie je zloženie zmesi 82% He, 13,5% N₂ a 4,5% CO₂. Táto zmes sa nachádza v uzatvorenej sklenenej trubici a je chladená prúdiacou vodou na povrchu rezonátoru, alebo priamo cez tepelný výmenník.

Proces zosilnenia žiarenia začína vybudením molekuly dusíku na hladinu E₄. Zrážkami s vybudenými molekulami dusíku sa molekuly oxidu uhličitého excitujú na energetickú hladinu E₃. Vyžiarenie fotónu nastane pri prechode molekuly CO₂ z hladiny E₃ na hladinu E₂. Následne oxidu uhličitému odníme excitačnú energiu

hélium, ktoré vďaka svojej vysokej tepelnej vodivosti ochladzuje aktívne prostredie a zaisťuje návrat molekúl CO₂ do základného energetického stavu.

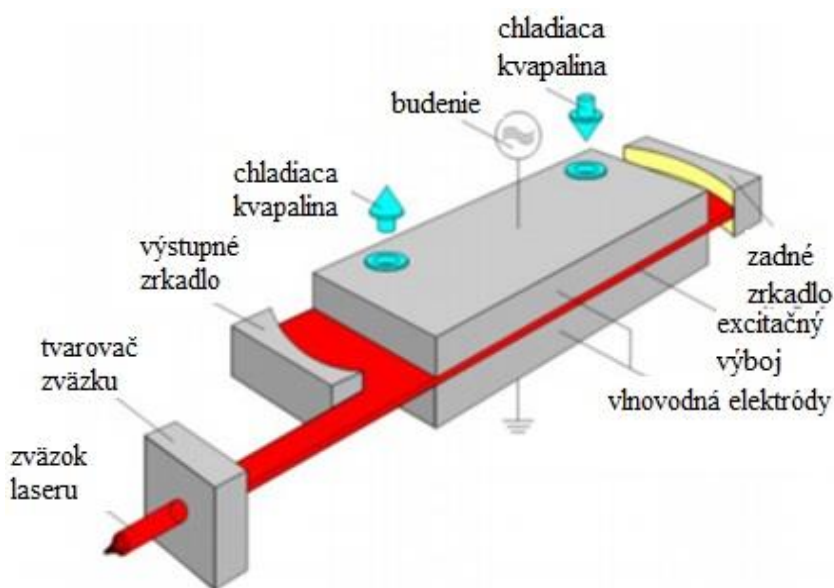
CO₂ lasery sú schopné kontinuálnej aj pulznej prevádzky. Ich výkon sa pohybuje medzi 0,5 až 20 kW, pričom maximálne hodnoty dosahujú až 200 kW. Vlnová dĺžka emitovaného žiarenia je 10,6 μm.

Budenie sa u CO₂ laserov väčšinou vykonáva elektrickým výbojom. Pre vedenie lúča sa používajú zrkadlá, ktoré sú zložité a náročné na údržbu a kalibráciu v porovnaní s vedením lúča optickým vláknom používaným pevnolátkovými lasermi. Účinnosť plynových CO₂ laserov je však vyššia ako u pevnolátkových laserov a dosahuje až 20%.

CO₂ lasery sú vysoko spoľahlivé a majú dlhú životnosť, no v porovnaní s pevnolátkovými lasermi sú rozmerné, nemobilné, náročné na údržbu a kalibráciu a závislé na prívode finančne náročných chladiacich kvapalín a pracovných plynov.

Existujú viaceré druhy CO₂ laserov, ktoré sa navzájom líšia spôsobom prúdenia laserového plynu a tvarom rezonátoru:

- **CO₂ laser s pomalým pozdĺžnym prúdením**
Aktívne prostredie získava energiu elektrickým výbojom, ktorého smer je zhodný s osou trubice. Jedná sa o najstarší typ CO₂ laseru, napriek tomu dokáže dosiahnuť veľmi kvalitné a hladké rezy
- **CO₂ laser s rýchlym pozdĺžnym prúdením**
Dosahuje výkon 1000W na meter dĺžky výbojovej trubice. Používa sa na rezanie, zváranie a povrchové úpravy materiálu
- **CO₂ laser s priečnym prúdením**
Budiaci výboj, prúdenie laserového plynu a samotný laserový lúč u tohto typu CO₂ laseru pôsobia tromi rôznymi smermi. Na jeden meter výbojovej trubice je možné dosiahnuť až 1 kW výkonu. Požíva sa na zváranie a tepelné spracovanie kvôli nižšej kvalite laserového zväzku.



Obr. 11 Konštrukcia Slab laseru [30]

- **Slab laser**
Kým u klasických plynových laserov je plyn chladený priechodom cez chladič v nútenom obehu, slab laser využíva difúzne chladenie, teda difúziu tepla do doskových vysokofrekvenčných medených elektród s veľkou plochou,

medzi ktorými je uzatvorené aktívne prostredie (obr. 11). Slab, alebo plošné lasery sú vysoko efektívne, spoľahlivé a dokážu získať vysokokvalitný laserový zväzok pri nižšej spotrebe laserového plynu. Dosahujú výkon 0,5 až 2,5 kW.

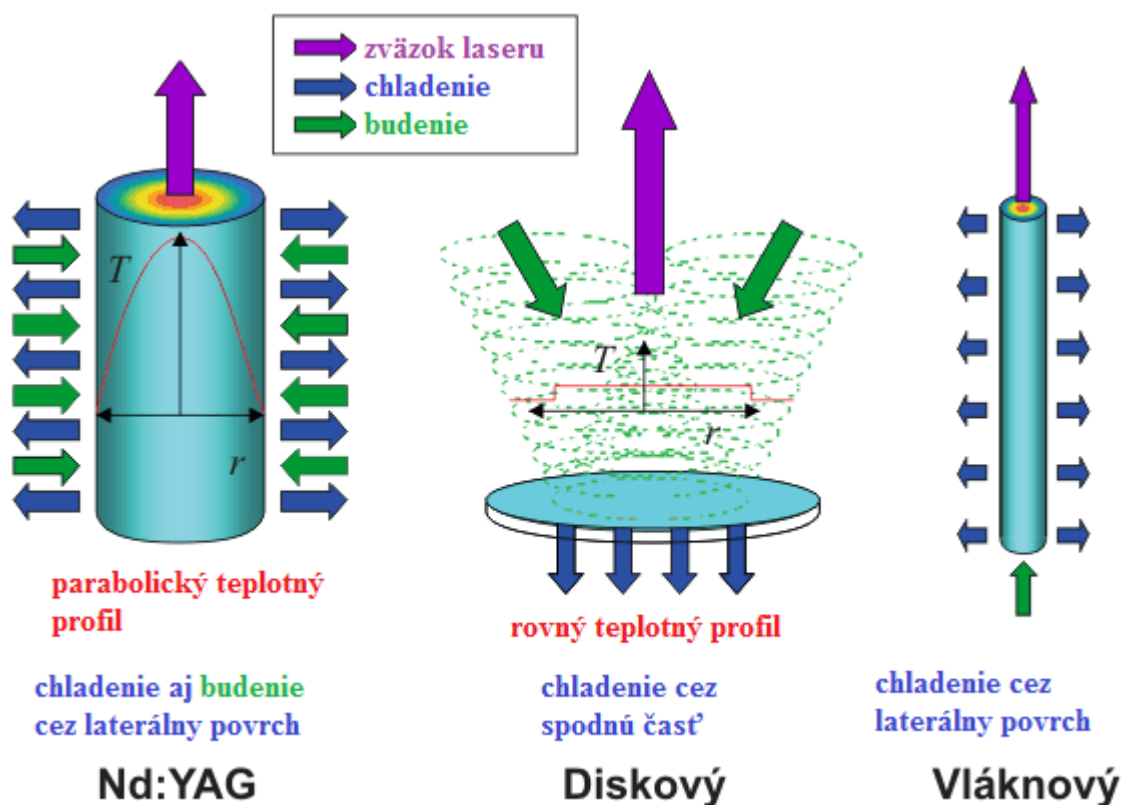
- **Excimerový laser**

Aktívne prostredie tohto typu laserov je tvorené umelo vytvorenými molekulami schopnými existovať iba vo vybudenom energetickom stave a ktoré sa po návrate do základného energetického stavu rozložia na jednotlivé atómy – excimermi. Excimery vznikajú zrážkami atómami plynu so zväzkom elektrónov s vysokou energiou. Využívajú sa najmä halogenidy a oxidy vzácnych plynov.

Excimerové lasery emitujú žiarenie o relatívne krátkej vlnovej dĺžke (157 až 351 nm), vďaka čomu dosahujú opracovanie s ostrými okrajmi pri minimálnom tepelnom zaťažení okolia rezu. Vďaka týmto vlastnostiam sa používajú najmä v oblasti elektroniky a jemnej mechaniky.

2.1.2 Pevnolátkové lasery [14], [15], [20], [25], [26], [38]

Aktívne prostredie pevnolátkových laserov je tvorené výbrusom kryštálu (rubín, neodýmové sklo, Nd:YAG, Yb:YAG) uloženým medzi nepriepustným a priepustným zrkadlom. Excitačná energia je čerpaná pomocou kryptónových výbojok uzavretých v reflexnej dutine. Aktívne prostredia pevnolátkových laserov možno rozlíšiť podľa tvaru na vláknové a diskové a Nd:Yag lasery (obr. 12).



Obr. 12 Aktívne prostredia pevnolátkových laserov [30]

Emitované žiarenie je vedené optickými káblami do technologickej hlavy, ktorá slúži na fokusáciu laserového lúča na obrábaný materiál.

V strojárskych praxi sa najčastejšie používajú Nd:YAG a Yb:YAG lasery, v menšej miere aj rubínové lasery.

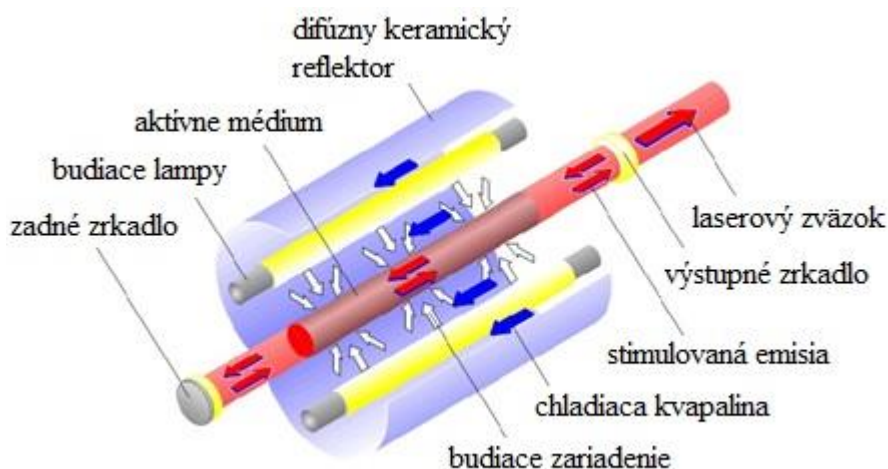
- **Rubínový laser**

Aktívne prostredie tvorí rubínový kryštál dopovaný trojmocnými iontami chrómu, ktoré sú zabudované v mriežke z oxidu hlinitého. Rubínový laser pracuje v pulznom režime s frekvenciou až 500 Hz pri vlnovej dĺžke generovaného žiarenia 0,694 μm . V praxi sa využíva najmä na vŕtanie tvrdých materiálov.

- **Nd:YAG**

Aktívne prostredie Nd:YAG laseru tvorí kryštál yttrium aluminium granátu ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopovaný iontami neodymu (Nd^{3+}). Čerpanie budiacej energie zabezpečujú kryptónové výbojky s bielym svetlom, prípadne laserové diódy, ktoré sú uzavreté v dutine rezonátoru. Tento typ laserov je schopný kontinuálnej aj pulznej prevádzky.

Nd:YAG lasery dosahujú výkon 10 kW v kontinuálnom režime a v pulznom režime je možné dosiahnuť vŕcholové výkony okolo 1 GW. Účinnosť je v prípade čerpania energie z kryptónových výbojok nízka, iba do 5% , no v prípade čerpania energie pomocou laserových diód je účinnosť 30%. Vlnová dĺžka emitovaného žiarenia je 1,064 μm .



Obr. 13 Konštrukcia Nd:YAG laseru [20]

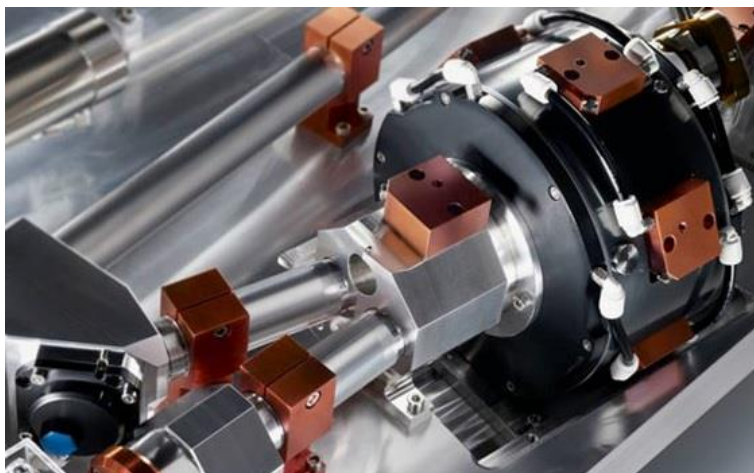
Nd:YAG laser je najdlhšie v priemysle používaný pevnolátkový laser. Nd:YAG lasery v súčasnosti postupne nahrádzajú doteraz najrozšírenejšie CO_2 lasery. Výhodou sú nižšie servisné náklady a možnosť vedenia laserového lúča optickým vláknom, čo umožňuje robotizáciu a automatizáciu. Konštrukcia NdYAG laseru je znázornená na obr. 13.

Tento typ laserov sa vyžíva v strojárstve na rezanie zvaranie a gravírovanie, ale taktiež v chirurgii a spektroskopii. Nd:YAG lasery budené výbojkami sa používajú najmä v pulznom režime na zvaranie a vŕtanie. Lasery budené laserovou diódou sa používajú v takzvanom Q-spínavom pulznom režime. V tomto režime laser generuje veľmi krátke pulzy trvajúce rádovo nanosekundy o výkone do 100W. Hlavné použitie je na značenie a gravírovanie kovov, plastov a iných materiálov

- **Diskový laser**

Aktívne prostredie diskových laserov je rovnako u Nd:YAG laserov tvorené kryštálom $Y_3Al_5O_{12}$ dopovaným iontami Nd^{3+} , no v tomto prípade je usporiadané do tvaru tenkého disku.

V prípade klasických Nd:YAG laserov nastáva tzv. thermal lensing effect (efekt tepelného zaostrenia), rozdielne teploty jadra a povrchu kryštálu zapríčinia vznik deformácie čelných plôch vplyvom dĺžkovej deformácie, až kým vplyvom tepelného gradientu a foto-elastického javu nenastane lom. Toto usporiadanie umožňuje efektívnejšie chladenie celého objemu aktívneho prostredia, čím účinne predchádza efektu tepelného zaostrenia.



Obr. 14 Diskový laser [30]

Čerpanie budiacej energie je zabezpečené laserovými diódami rozostavenými po obvode disku.

Emitované žiarenie má vlnovú dĺžku $1,029 \mu m$. Efektívne chladenie umožňuje diskovým laserom dosahovať vysoké výkony, až 16 kW s dobrou kvalitou laserového lúča. Ich nevýhodou však je nižšia účinnosť oproti vláknovým laserom (15 až 20%) a nižšia životnosť.

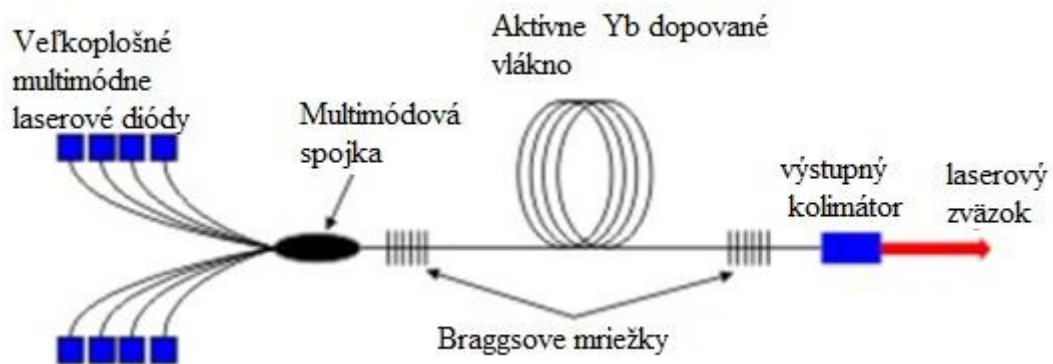
Diskové lasery sa v strojárskych praxi využívajú na výkonovo náročné operácie ako zvarovanie a rezanie kovov.

- **Vláknový laser**

Jedná sa o technologicky najmodernejší pevnolátkový laser. Aktívne prostredie je podobne ako u diskového a Nd:YAG laseru tvorené $Y_3Al_5O_{12}$, ktoré je však dopované iontami erbia (Er, vlnová dĺžka žiarenia $1,06-1,12 \mu m$), ytterbia (Yb, vlnová dĺžka žiarenia $1,54-1,62 \mu m$) alebo thulia (Tm, vlnová dĺžka žiarenia $1,72-2 \mu m$). Toto aktívne prostredie je usporiadané do dlhého vlákna o priemere 1 až $6 \mu m$ dlhého niekoľko metrov. Toto usporiadanie má rovnaký dôvod ako pri diskovom lasery, a tým je rovnomerné chladenie celého objemu aktívneho prostredia. Toto optické vlákno je zároveň rezonátor, ktorý namiesto koncových zrkadiel používa Braggovského mriežky - štruktúry priamo na optickom vlákne na ktorých sa lúč odráža vďaka špecifickým zmenám indexu lomu.

Čerpanie budiacej energie zabezpečujú laserové diódy kolmé na prierez. Emitovaný laserový lúč je vedený optickým vláknom s aktívnym prostredím priamo na obrábaciu hlavu.

Vláknový laser je veľmi jednoduchej konštrukcie, celý je tvorený len optickým vláknom a laserovým modulom (obr. 15). Pridávaním laserových modulov je možné zvýšiť výkon laseru až na 80 kW.



Obr. 15 Konštrukcia vláknového lasera [30]

Tento typ laserov je schopný kontinuálnej aj pulznej prevádzky. Účinnosť je 30 až 35%. Výhodou voči ostatným pevnolátkovým aj plynovým laserom sú malé rozmery, jednoduchosť konštrukcie, nízke prevádzkové a servisné náklady. Nevýhodou ale zostáva vysoká nákupná cena. V kontinuálnom režime sa tento druh laserov využíva na zváranie a rezanie, v pulznom na gravírovanie a značenie.

2.1.3 Polovodičové lasery [15], [20], [30]

Polovodičové lasery obecné známe ako laserové diódy sú najnovšou skupinou laserov. Emisia žiarenia vzniká v tenkej prechodovej vrstve medzi polovodičmi typu P a N. Budiacu energiu dodáva elektrický prúd, ktorý prechádza diódou a excituje atóm v prechodovej vrstve medzi polovodičmi do vyšších energetických hladín. Samotná emisia v podobe svetla a tepla nastáva pri prechode excitovaných atómov na základný energetický stav.

Druh materiálov oboch polovodičov a hrúbka prechodovej vrstvy majú veľký vplyv na kvalitu a použiteľnosť laserovej diódy. Prechodová vrstva musí byť dostatočne tenká aby bolo možné dosiahnuť monochromatickosti žiarenia.

Polovodičové lasery emitujú žiarenie o vlnovej dĺžke 0,8 až 0,98 μm , majú vysokú elektrickú účinnosť (25 – 55%) a sú schopné kontinuálnej aj pulznej prevádzky.

Medzi nevýhody polovodičových laserov patrí závislosť na teplote aktívneho polovodičového materiálu a rozbiehavosť lúča. V súčasnosti sa využívajú pri pájkovaní, kalení, navarovaní a lepení, ale vďaka malým rozmerom, aj vo výpočtovej technike a optoelektronike. Polovodičové lasery je možné rozdeliť na lasery budené elektrónovým zväzkom a injekčné polovodičové lasery

- **Polovodičový laser budený zväzkom elektrónov**

Aktívne prostredie tohto typu lasera, tiež známeho ako diódový laser, tvorí blok polovodičov. Aj keď najpoužívanejšie je čerpanie budiacej energie pomocou zväzku elektrónov, v menšej miere sa využíva aj optické budenie alebo budenie elektrickým poľom. Elektróny prechádzajúce blokom polovodičovým blokom iniciujú prechody z pásu valenčného do pásu vodivostného.

Do tejto skupiny patrí galium arsenidový laser (GaAs), kadmium sulfidový laser (CdS) a kadmium selenidový laser (CdSe).

Emitovaná žiarenie dosahuje vlnovú dĺžku 808 až 940 nm pri výstupnom výkone 0,03 až 8 kW. Diódové lasery sa v praxi využívajú najmä ako budenie pre iné typy priemyselných laserov (Nd:YAG a vláknové lasery).

- **Injekčné polovodičové lasery**

Aktívne zloženie injekčných polovodičových laserov sa skladá z polovodičov typu P a N, ktoré vytvárajú P-N prechod. Budiaca energia sa čerpá priložením elektrického poľa k P-N prechodu a rezonátor tvoria vybrúsené strany polovodičov. Samotné laserové žiarenie vzniká emisiou, odrazom od zrkadiel otvoreného rezonátoru, a mnohonásobným prechodom cez P-N prechod.

Výkon tohto typu laserov sa pohybuje v rádoch wattov a vyžitie nachádza napríklad v laserových ukazovákach, tlačiarňach, čítačkách, CD prehrávačoch, ale aj v medicíne pri vyrezávaní kožných anomálií.

3 PRINCÍP LASEROVÉHO REZANIA [14], [15], [19], [20], [48]

V súčasnosti najrozšírenejším využitím výkonných laserov v strojárstve je rezanie. Táto technológia umožňuje deliť všetky druhy technických materiálov, nezávisle od ich tepelných chemických a fyzikálnych vlastností, vysokej koncentrácii energie, ktorou je laserový lúč nahradzujúci konvenčný nástroj schopný dosiahnuť. Od ostatných technológií delenia materiálu sa laserové rezanie odlišuje vysokou reznou rýchlosťou – v metroch až desiatkach metrov za sekundu, presnosťou rezania vysokou 0,05 až 0,1 mm na meter dĺžky rezu, a veľmi dobrou kvalitou rezných plôch (drsnosti cca Ra 1,6).

Samotný princíp laserového rezania spočíva v tom, že zaostrý zväzok fotónov pri dopade nahreje materiál v mieste dopadu na teplotu varu a nataví materiál v bezprostrednej blízkosti. Laserový lúč dopadajúci na materiál spôsobuje prudký nárast teploty na jeho povrchu. Energiu dopadajúceho lúča možno rozdeliť na absorbovanú, odrazenú, a v prípade priehľadných materiálov prejdenu. Vo všeobecnosti platí, že čím je lepšia elektrická vodivosť materiálu, tým je nižšia jeho schopnosť absorpcie energie. To vyplýva z faktu, že laserový lúč je elektromagnetické vlnenie, ktoré reaguje s atómami rezaného materiálu, čím vzniká elektrický prúd, ktorý je následne v dôsledku obmedzenej tepelnej vodivosti materiálu premenený na teplo. Z tohto dôvodu patria druh materiálu a stav jeho povrchu k zásadným parametrom ovplyvňujúcim rezný proces.

Pary kovov a tavenina, ktoré vzniknú v mieste rezu v priebehu rezného procesu sú následne odstránené prúdením pracovného plynu, ktorý je pod vysokým tlakom hnaný výstupnou tryskou okolo samotného laserového lúča. Na začiatku rezania, pri zapálení laserového lúča na materiál sa roztavený materiál pohybuje proti smeru lúča, keďže otvor zápalu má kužeľový tvar s vrcholom smerujúcim do rezaného materiálu. Následne dôjde k prepáleniu materiálu naskrz a tavenina je strhávaná dotykovým šmykovým napätím pracovného plynu a vyfukovaná von cez reznú medzeru.

V tejto kapitole budú popísané jednotlivé metódy laserového rezania, vplyv rezných parametrov na proces rezania, vady reznej hrany a ich vznik.

3.1 Metódy laserového rezania [15], [19], [25], [48]

Laserové rezanie je možné rozdeliť na sublimačné, tavné a oxidačné rezanie a metódu MicroJet. Jednotlivé metódy sa navzájom líšia výkonom lúča, reznou rýchlosťou, použitým pracovným plynom, a kvalitou rezu, pričom niektoré sa používajú najmä na pre ne špecifické druhy rezaných materiálov.

- **Sublimačné rezanie**

Sublimačné rezanie využíva pulzný laserový lúč o vysokej energetickej hustote, ktorý ohrieva materiál na teplotu varu a dochádza k intenzívnemu vyparovaniu materiálu. Kovové pary vzniknuté odparením materiálu unikajú sú odstránené slabým prúdom pracovného plynu v dobe medzi jednotlivými pulzmi. Aby pary znovu nekondenzovali a nezatavili rez musí byť hrúbka rezaného materiálu menšia alebo rovná priemeru lúča. Požívané pracovné plyny sú dusík alebo argón, ktoré zabraňujú oxidácii rezaného materiálu.

Táto metóda sa používa pri rezaní tenkých plechov a narezanie a vrtanie minerálov. K jej výhodám patrí že materiál sa netaví ale priamo vyparuje, čím je dosahovaná hladká a rovná rezná hrana. To ale tiež znamená omnoho vyššiu energetickú náročnosť rezného procesu

- **Tavné rezanie**

Pri tavnom rezní je materiál ohrievaný na teplotu tavenia kontinuálnym laserovým lúčom. Rezaný materiál sa lokálne nataví a vzniknutá tavenina je vyfukovaná prúdom pracovného plynu. Pracovný plyn je neaktívny, teda sa nepodieľa na procese rezania. Najčastejšie používaný je dusík, ktorý je hnaný pod vysokým tlakom (1-2 MPa) aby dokázal zabrániť tavenine v zachytávaní sa na spodnej hrane rezu. V porovnaní s ostatnými metódami dosahuje tavné rezanie pomerne nízke rezné rýchlosti. V praxi platí že čím je materiál hrubší, tým je rezná rýchlosť nižšia, a naopak, čím je výkon laseru vyšší, tým vyššia je rezná rýchlosť.



Obr. 16 Poloha ohniska pri tavnom laserovom rezaní [25]

Výhodou tejto metódy je lesklý povrch rezných plôch bez oxidov a charakteristického oxidického zafarbenia, ktorý nevyžaduje dokončovacie úpravy.

Tavné rezanie sa používa najmä na delenie vysokolegovaných ocelí, medi, hliníka, niklu a ich zliatin, ale tiež aj na delenie nekovových materiálov ako sú keramika, drevo a plexisklo. Ohnisko sa pri tejto metóde rezania nachádza v spodnej časti rezu (obr. 16).

- **Oxidačné rezanie**

Od tavného rezania sa oxidačné rezanie líši použitím kyslíku, ktorý podporuje horenie, ako pracovného plynu. Kyslík je hnaný pod nižším tlakom (3 až 5 barov). Pri vstupe kyslíku do rezného procesu nastane exotermická reakcia kyslíku s rezaným materiálom prebiehajúca pri príslušnej zápalnej teplote, po dosiahnutí ktorej už ohrev laserom teoreticky není nutný. V praxi sa teplo uvoľnené touto reakciou využíva na predohrev okolia rezu a ohrev vzniknutej taveniny a oxidov.



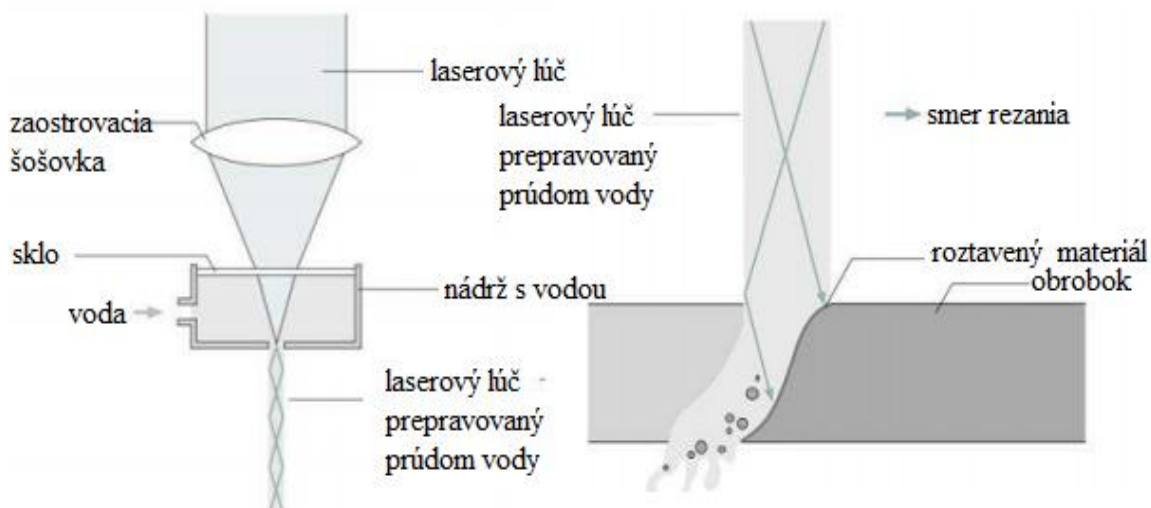
Obr. 17 Poloha ohniska pri oxidačnom rezaní [25]

Oxidačné rezanie sa využíva najmä na delenie nelegovanej a stredne legovanej oceli. Výhodou sú nízka energetická náročnosť, vyššia rezná rýchlosť a možnosť rezať hrubšie materiály ako pri tavnom rezaní, no zároveň sú rezné plochy nekvalitnejšie s vyššou drsnosťou a väčším tepelne ovplyvneným pásom. Rezné hrany sú navyše pokryté vrstvou oxidov. Preto sa táto metóda nehodí na rezanie ostrých geometrických tvarov a malých otvorov. Ohnisko laserového lúča sa pri tejto metóde laserového rezania nachádza pri hornej hrane rezu (obr.17).

- **MicroJet rezanie**

Táto technológia laserového rezania sa od ostatných odlišuje tým že nepoužíva pracovný plyn, ktorý nahradzuje vodou. Jemný prúd vody obklopuje laserový lúč a vedie ho podobne ako optické vlákno. Takto vedený lúč roztavuje rezaný materiál. Voda odplavuje taveninu, chladí miesto rezu čím znižuje tepelne ovplyvnenú oblasť, a zároveň vytvára tenký film na povrchu obrobku, ktorý zabraňuje rozstrekovaniu vody (obr. 18).

Touto špeciálnou technológiou je možné dosiahnuť veľmi kvalitné, rovné a zvislé rezné hrany, preto sa využíva najmä na rezanie malých a zložitých súčastí.



Obr. 18 Princíp MicroJet rezania [19]

3.2 Parametre laserového rezania [15], [19], [40], [48]

Kvalita rezu pri rezaní laserov závisí od mnohých parametrov. Tieto parametre môžeme zadeliť do troch skupín: parametre laserového žiarenia, parametre procesu a parametre rezaného materiálu.

- **Parametre laserového žiarenia**

- výkon laseru
- pracovný mód laseru
- stálosť výkonu
- geometria zväzku lúčov
- frekvencia pulzov
- divergencia žiarenia
- polarizácia žiarenia

- **Parametre procesu**

- rezná rýchlosť
- druh pracovného plynu
- tlak plynu
- poloha ohniska

- **Parametre materiálu**

- druh materiálu
- hrúbka materiálu
- stav povrchu materiálu
- tvar rezanej súčasti

3.2.1 Parametre laserového žiarenia [25], [26] [40], [48]

Parametre laserového žiarenia zahŕňajú vlastnosti samotného laserového lúča. Na rezný proces má z nich najvýznamnejší vplyv výkon, pracovný mód laseru a frekvencia jednotlivých pulzov.

- **Výkon laseru**

Výkon laseru udáva, aký hrubý materiál je schopný daný laser rezať. V priebehu pracovného procesu je možné výkon laseru regulovať podľa potreby danej súčasti. Opotrebovaním a zanesením šošovky sa znižuje maximálny výkon laseru. Vplyv výkonu laseru na kvalitu rezných hrán je znázornený na obr. 19.



Obr.19 Vplyv výkonu laseru na kvalitu rezných hrán [26]

- **Pracovný mód laseru**

Jedná sa v podstate o dobu, po ktorú lúč pôsobí na obrábaný materiál. V praxi sa rozlišuje kontinuálny a pulzný mód. V kontinuálnom móde pôsobí lúč na obrobok nepretržitú dobu. Tento mód sa využíva najmä na rezanie štandardných hrúbok plechov v rádoch milimetrov až centimetrov. V pulznom móde pôsobí lúč na materiál nespojito, v podobe jednotlivých pulzov, čo umožňuje rezať krehké materiály, ktoré vyžadujú odvod tepla z miesta rezu v priebehu procesu

- **Frekvencia pulzov**

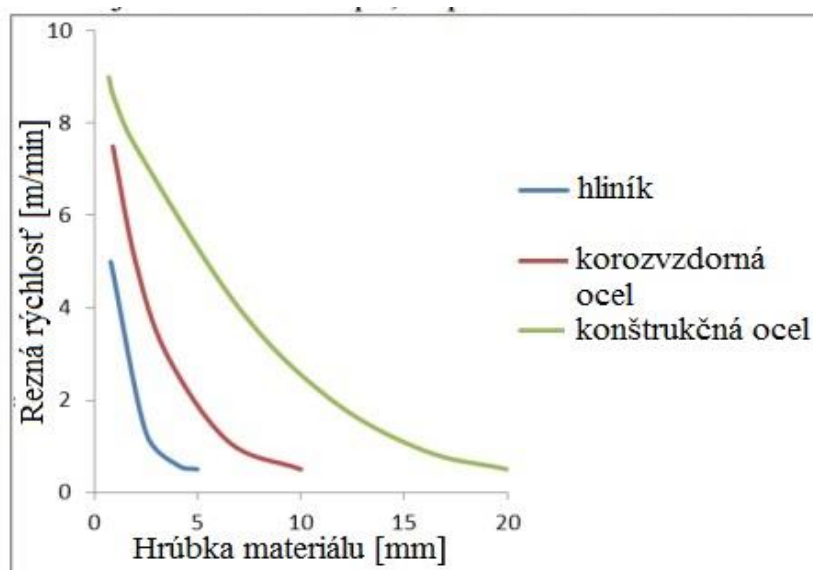
U pulzného pracovného módu hrá dôležitú úlohu frekvencia jednotlivých pulzov, zvaná aj duty. Táto veličina udáva percentuálny pomer medzi dobou kedy je laser vypnutý a kedy zapnutý. Tento pomer sa líši od hrúbky a druhu jednotlivých materiálov, v závislosti na ich potrebe odvodu tepla.

3.2.2 Parametre rezného procesu [25], [27],[28], [40], [48]

Parametre rezného procesu najviac ovplyvňujú kvalitu výsledných rezných plôch. Rezná rýchlosť má na kvalitu rezu najväčší vplyv hneď za správne zvoleným výkonom laseru. Poloha ohniska, správne zvolený pracovný plyn a jeho tlak sú taktiež zásadnými faktormi ovplyvňujúcimi rezanie.

- **Rezná rýchlosť**

Voľba optimálnej reznej rýchlosti závisí od výkonu laseru, druhu materiálu a jeho hrúbky. V praxi obecné platí, že čím hrubší materiál tým nižšia rýchlosť a čím vyšší výkon tým vyššia rýchlosť (obr.20). Veľkosť reznej rýchlosti tiež ovplyvňuje tvar rezanej súčasti, pri priamych rezoch sa volí vyššia rezná rýchlosť ako pri vyrezávaní otvorov a tvarovo náročných rezov. V prípade zlého nastavenia reznej rýchlosti môže dôjsť k tvorbe zápalov, otrepov a príliš vysokej drsnosti reznej plochy.



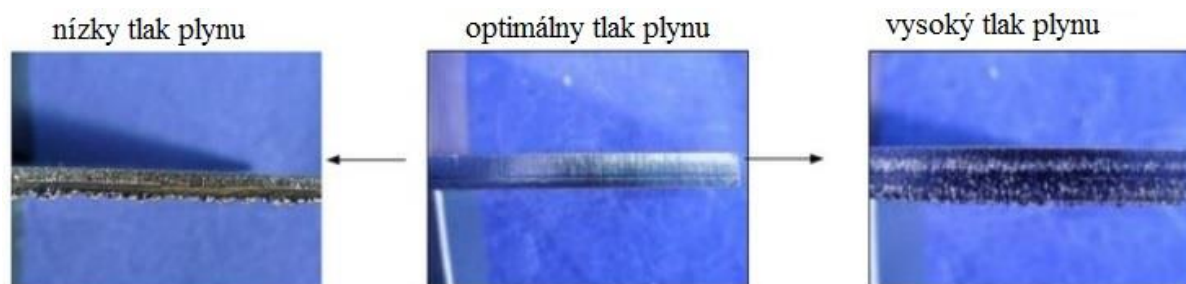
Obr. 20 Závislosť reznej rýchlosti na hrúbke materiálu [25]

- **Druh pracovného plynu a jeho tlak**

Druh pracovného plynu závisí od druhu rezaného materiálu, požadovanej kvality rezu a určuje metódu, ktorou budeme materiál rezať. Kyslík sa používa pri oxidačnom rezaní nelegovaných a stredne legovaných ocelí, pre rezanie korozivzdorných ocelí a zliatin hliníku sa využíva tavné rezanie, pri ktorom je pracovným plynom dusík. Dôležité je dodržanie čistoty pracovného plynu aby nedochádzalo k tvorbe otrepov. Predpísaná čistota je u kyslíku 99,95%, pri dusíku až 99,999%.

Tlak pracovného plynu sa volí podľa hrúbky a druhu rezaného materiálu a druhu pracovného plynu. Pri oxidačnom rezaní kyslíkom sa tenké materiály režu pri vysokom tlaku, zatiaľ čo hrubé materiály pri nízkom tlaku. Pri tavnom rezaní za použitia dusíka sa používa pri tenkých materiáloch nižší tlak, pri hrubších vyšší. Tryska, ktorou je hnaný pracovný plyn býva umiestnená čo najbližšie povrchu rezaného materiálu, no dostatočne vzdialená aby nebola znečistená taveninou (obvykle 0,1 až 2,5 mm).

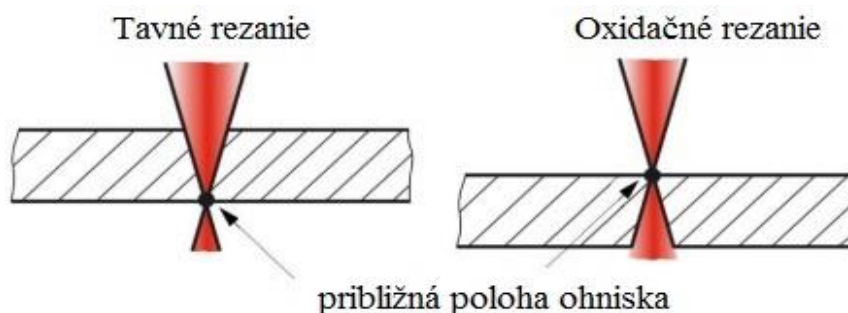
Pokiaľ je zvolený tlak príízky, tavenina nie je správne vyfukovaná z rezu a uchyťava sa na jeho spodnej hrane. Pokiaľ je tlak privysoký tavenina je rozstrekovávaná (obr.21).



Obr. 21 Vplyv tlaku procesného plynu na vznik otrepú [26]

- **Poloha ohniska**

Ohnisko je miesto, kde má laserový lúč najnižší priemer a najvyššiu energiu, neexistuje ideálne ohnisko v podobe bodu. Poloha ohniska závisí od metódy rezania. V prípade tavného rezania sa ohnisko nachádza blízko spodnej hrany rezu, zatiaľ čo u oxidačného rezania blízko hornej hrany rezu (obr. 22).



Obr. 22 Poloha ohniska pri tavnom a oxidačnom rezania [28]

3.2.3 Parametre materiálu [25], [26],[28], [40]

Druh materiálu, jeho hrúbka a požadovaný tvar sú základné faktory, od ktorých sa odvíja voľba ostatných procesných parametrov.

- **Druh materiálu**

Pri rozbere druhu materiálu pre laserové rezanie sa hodnotí jeho odrazivosť, absorpcia, tepelná vodivosť, teplota tavenia a teplota odparovania. Odrazivosť určuje koľko z energie dopadajúcej na materiál sa odrazí. Absorpcia určuje schopnosť materiálu meniť energiu laserového lúča na teplo. Tepelná vodivosť udáva veľkosť tepelne ovplyvnenej oblasti.

Pri rezaní železných materiálov, najmä pri oxidačnom rezaní, kde hrozí prehriatie spodnej reznej hrany a vznik pittingu sa volí nižší výkon a rezná rýchlosť a vyšší tlak plynu.

U neželezných kovov ako sú zliatiny hliníka, ktoré majú vysokú odrazivosť a tepelnú vodivosť sa používa vysokotlakové tavné rezanie dusíkom.

- **Hrúbka materiálu**

Hrúbka materiálu má vplyv najmä na potrebný výkon laseru. Čím je rezaný materiál hrubší, tým vyšší výkon je potrebný.

- **Tvar rezanej súčasti**

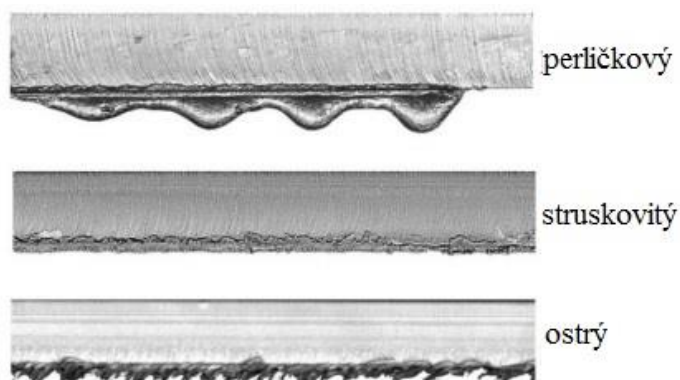
Tvar rezanej súčasti ovplyvňuje hlavne veľkosť reznej rýchlosti. Pri rezaní rovných rezov je možné použiť vyššiu reznú rýchlosť ako pri vyrezávaní otvorov a rezaní tvarovo zložitých rezov.

3.3 Vady rezných plôch [14], [26],[28], [41], [44], [46]

V prípade, že rezné parametre nie sú prispôsobené materiálu, jeho druhu, hrúbke alebo požadovanému tvaru súčasti, či v prípade zle nastavenej alebo neskalibrovannej optickej sústavy, vznikajú na rezných plochách rôzne vady. Medzi najčastejšie sa vyskytujúce sa vady patrí otrep, nesúmerná rezná medzera, sklzy, pitting a nadmerná drsnosť.

- **Otrep**

Otrepy vznikajú na spodnej hrane rezu. Delia sa na tri druhy, ostrý, struskovitý a perličkový. Ostré otrepy sú najbežnejšie a je ich možné ľahko odstrániť. Ostré otrepy spôsobujú ostrú spodnú hranu rezu. Struskovitý otrep vzniká na povrchu rezaného materiálu pri prskaní taveniny, dá sa ľahko odstrániť. Perličkový otrep je tvorený kvapkami stuhnutého kovu v mieste rezu, zo všetkých druhov otrepov je najnáročnejší na odstránenie.



Obr. 23 Druhy otrepov [28]

- **Nesúmerná rezná hrana**

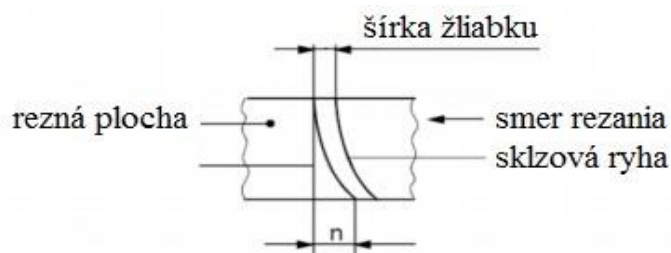
Jedná sa o dôsledok tvaru laserového lúča. Pri vníkaní do obrobku nie je lúč súbežný na hornej a spodnej hrane rezu, čím vzniká nesúmernosť. Samotná šírka reznej hrany je závislá najmä od hrúbky materiálu, jeho druhu, metóde rezania a ohniskovom priemere laserového lúča. U tenkých plechoch hrubých 1-6 mm býva rezná medzera hrubá 0,15mm, u plechov hrubých 20 až 30 mm môže dosiahnuť až 0,5mm.,

- **Pitting;**

Pitting sú povrchové erózie rôznych širok, hĺbok a foriem, ktoré narušujú súrodosť rezných plôch. Vznikajú v dôsledku zmien smeru rezania a prítomnosti vmestkov.

- **Sklz**

Skľzové ryhy sú typické pre laserové rezanie. Pri nízkych rezných rýchlostiach sú zhodné so smerom laserového lúča, no či je rezná rýchlosť vyššia, tým veľkosť sklzu proti smeru rezania zväčšuje. Vznik sklzu je znázornený na obrázku 24.



Obr. 24 Schéma sklzu [28]

4 DRSNOSŤ REZNÝCH HRÁN [11], [25],[28], [46]

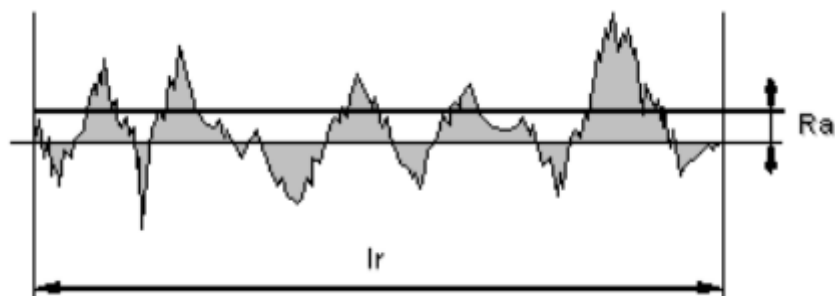
Príčinou vzniku drsnosti, ktorá je vyššia ako prípustná pre ďalšiu funkčnosť súčasti, je nesprávna voľba rezných parametrov, metódy rezania, alebo materiálu. Parametre najviac ovplyvňujúce výslednú drsnosť rezných plôch sú druha hrúbka materiálu a veľkosť reznej rýchlosti.

Drsnosť povrchu má veľký vplyv na životnosť, spoľahlivosť, trenie a odolnosť voči opotrebeniu súčastí. Spolu s rozmerovou a geometrickou drsnosťou určuje akosť povrchu.

V prípade laserového rezania sa sleduje krivka profilu nerovnosti v rovine rezu kolmej k povrchu. Po odfiltrovaní základného profilu a vlnitosti povrchu sa získa tzv. profil drsnosti, z ktorého sa následne získajú parametre pre vyhodnotenie drsnosti povrchu, stredná aritmetická úchylka drsnosti (R_a) a výška nerovností (R_z)

- **R_a - Stredná aritmetická úchylka drsnosti**

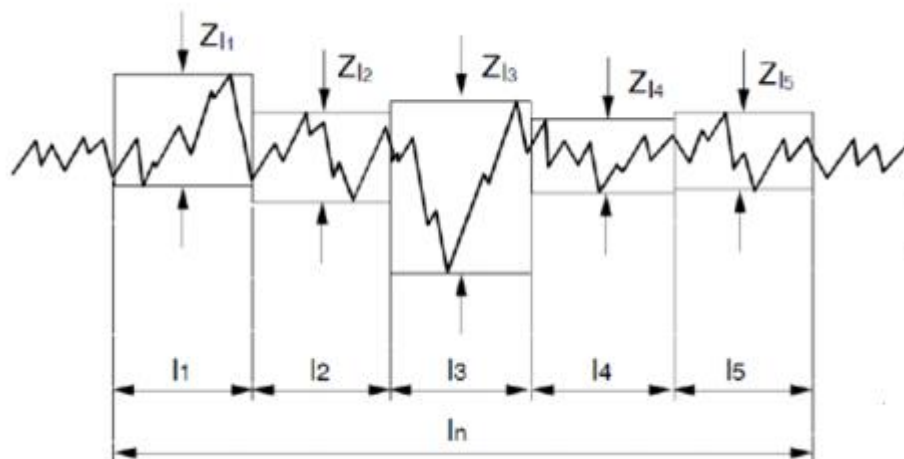
Je definovaná ako stredná aritmetická hodnota absolútnych úchyliet profilu drsnosti od strednej čiary na základnej dĺžke. Tento parameter je v podstate aritmetickým priemerom, takže extrémne výšky hrotov a priehlbni sú vo výslednej hodnote potlačené. Taktiež hroty a priehlbne od seba navzájom nerozlišuje.



Obr. 25 Stredná aritmetická úchylka drsnosti R_a [25]

- **R_z – priemerná výška prvkov profilu**

Je definovaná ako aritmetický priemer vzdialeností medzi piatimi najvyššími a piatimi najnižšími bodmi a jeho stredovou čiarou na základnej dĺžke. Vyjadruje najvyššiu nameranú úchylku od strednej čiary. Okrem týchto parametrov sa pri meraní drsnosti používajú aj ďalšie parametre ako najväčšia hĺbka drsnosti (R_t) ktorá je podobná ako R_z ale sleduje maximá na celej dĺžke hodnoteného profilu.



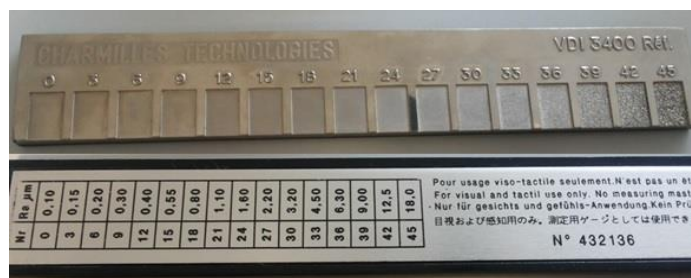
Obr. 26 Priemerná výška prvkov profilu R_z [28]

Ďalším je priemerná kvadratická úchylka profilu (R_q), ktorá umocňuje všetky hodnoty R_a na druhú mocninu, teda dosahuje vyššiu citlivosť na výskyt priehlbni a hrotov. Obe tieto parametre sú ale v praxi používané len zriedka.

4.1 Meranie drsnosti [8], [11],[25], [40], [46]

Drsnosť povrchu je možné zistiť voľným okom, porovnávacou šablónou, dotykovými profilometrami a meracími prístrojmi, pomocou komparačného mikroskopu a metódou svetelného rezu.

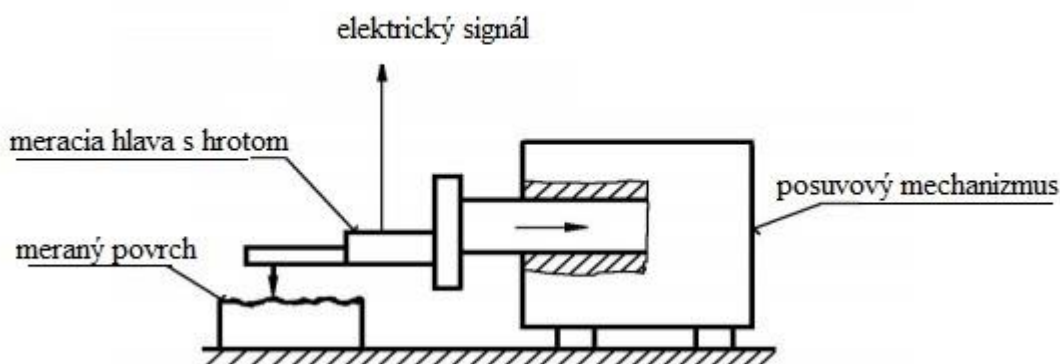
Použitie komparačnej šablóny nesúcej na sebe etalón materiálu s rôznymi drsnosťami pre daný typ obrábania je najlacnejším spôsobom merania drsnosti (obr. 27).



Obr. 27 Komparačná šablóna

Komparačný mikroskop, metóda svetelného rezu a meranie s využitím interferencie svetla sú bezkontaktné metódy, schopné znázorniť skúmaný povrch v 3D. Komparačný mikroskop slúži na analyzovanie veľmi jemných štruktúr, ktoré následne trojrozmerné vykreslí. Metóda svetelného rezu vyživa dvojité mikroskop, ktorý sníma rovnobežné zväzky lúčov vyslané na meraný povrch pod uhlom 45° ktoré vytvoria obraz profilu šikmého rezu nerovnosti plochy v tvare svetlozelenej stužky v tmavom poli. Interferenčný mikroskop využíva interferenciu dvoch lúčov svetla na získanie obrazu povrchu tvoreného interferenčnými prúžkami.

Najpoužívanejšou metódou merania drsnosti povrchu je meranie dotykovými profilometrami (obr. 28). Pri tejto metóde hrot upevnený na meracej hlavici prechádza po meranom povrchu, pričom pri kontakte s nerovnosťami hrot hlavice vychyluje a tá tieto odchylky transformuje na elektrický signál, ktorý je následne zosilňovaný, filtrovaný a spracovávaný. Posuvová rýchlosť hlavice musí byť konštantná a je zabezpečovaná pneumaticky alebo elektromotorom. Táto metóda umožňuje určiť súčasne číselná hodnoty niekoľkých parametrov drsnosti.



Obr. 28 Dotykový profilometer [11]

5 DRUHY REZANÝCH MATERIÁLOV [6], [8],[15]

V tejto kapitole budú popísané materiály, ktorých kvalita rezných hrán v závislosti na rezných parametroch bude predmetom praktickej časti tejto práce. Konkrétne sa jedná o hliník Al 99,5, mosadz CuZn37 a bezkyslíkatá meď Cu-DHP.

5.1 Hliník a jeho zliatiny [13], [15]

Hliník je ľahký kov s vysokou tepelnou a elektrickou vodivosťou, a koróznou odolnosťou. Vďaka nízkej hmotnosti, dostatočnej pevnosti, dobrej tvárnosti, zvariteľnosti a nízkej cene patrí k v strojárstve najvyužívanejším neželezným kovom. Jeho hustota je $2,7 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a teplota tavenia 658°C .

Hliník sa v prírode vyskytuje vo forme zlúčenín, najčastejšie bauxitu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$). Čistý hliník sa v súčasnosti získava elektrolýzou zmesi čisteného bauxitu a kryolitu pri teplote 950°C , keď sa na katóde vylučuje čistý hliník a na anóde kyslík.

Korózia hliníku prebieha odlišne ako korózia železa. Hliník spočiatku oxiduje a na povrchu sa vytvorí vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3) s veľmi veľkou tvrdosťou a teplotou tavenia (2000°C). Táto vrstva je nepriepustná pre kyslík, aj ďalšie chemické látky a poskytuje ochranu pred hĺbkovou koróziou.

V praxi sa hliník využíva hlavne vo forme zliatin s meďou (dural) alebo s horčíkom ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$). Uplatnenie nachádza v strojárstve pri výrobe menej namáhaných konštrukcií a spotrebných predmetov, v potravinárstve a farmakológii v podobe hliníkových fólií a ako tepelná izolácia, a v elektrotechnike na výrobu širokého spektra vodičov.

- **Hliník Al 99,5 (AW 1050 H24)**

Jedná sa o jednu z najpopulárnejších akostí hliníku, používaná prakticky vo všetkých odvetviach priemyslu (elektrotechnický, chemický, potravinársky, letecký, strojársky, stavebný, automobilný priemysel). Používa sa najmä na prvky málo namáhané, ktoré vyžadujú materiál s vysokou tvárnosťou, dobrou zvariteľnosťou, vysokou odolnosťou voči korózii a s veľmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivosťou. Hliník Al99,5 je zvariteľný prakticky všetkými spôsobmi, no v dôsledku vysokej húževnatosti je jeho obrobiteľnosť zlá. Typické výrobky pre tento materiál sú elektrotechnické výrobky, výmenníky chemických zariadení, chladiče automobilov, reflektory, zrkadlá, obaly, kryty, nádrže, okenné rámy, dvere a vybavenie vagónov. Chemické zloženie hliníku Al 99,5 je uvedené v tab. 1.

Tab. 1 Chemické zloženie Al99,5 [13]

Chemické zloženie Al99,5 (hm.%)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ostatné	Al
min.	-	-	-	-	-	0,07	0,05	-	99,5
max.	0,30	0,40	0,05	-	-	-	-	-	

5.2 Med' a jej zliatiny [6], [15],[16]

Med' sa vyznačuje vysokou tepelnou a elektrickou vodivosťou, korozivzdornosťou, mäkkosťou, tvárnosťou, zlou zlievateľnosťou a obrábiteľnosťou, no dobrou zvariteľnosťou a pájateľnosťou. Čistá med' má hustotu $8,9 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$, teplotu tavenia 1083°C , pevnosť 230 N.mm^2 a ťažnosť 50%. Využíva sa najmä na výrobu elektrických vodičov, výmenníkov tepla a na galvanické povlaky. Jej zliatiny sa delia na bronzy a mosadze.

- **Mosadz**

Mosadz je zliatina medi a zinku obsahujúca tiež olovo, hliník, nikel a ďalšie prísady. Obsah medi v mosadzi zásadne ovplyvňuje jej vlastnosti, pokiaľ obsahuje menej ako 58% je príliš krehká a tvrdá a v praxi sa nepoužíva. Mosadze s obsahom medi nad 80 % sa nazývajú tombaky, sú korozivzdorné, tvárne, a používajú sa na výrobu trubiek, drôtov, výmenníkov tepla a lopatiek parných turbín. Mosadze s obsahom medi 63 až 68% sa používajú na výrobu pružín a elektrotechnických súčastí ako objímky žiaroviek, a súčasti spínačov. Niklové mosadze s obsahom niklu 12 až 20% sa vďaka dobrej ťažnosti spracúvajú hlbokým ťažením, v minulosti slúžili na výrobu prístrojov.

- **Mosadz CuZn37**

Jedná sa o najbežnejšie používanú mosadz vo výrobe. Je dobre spracovateľná za studena a vhodná k pokovovaniu. Podiel medi v mosadzi CuZn37 je 63%. Jej korózna odolnosť je nižšia než u mosadzí s vyšším obsahom medi. Chemické zloženie je uvedené v tab. 2.

Tab. 2 Chemické zloženie CuZn37 [16]

Chemické zloženie CuZn37 (hm.%)									
	Sn	Fe	Cu	Pb	Ni	Zn	Al	Ostatné	Cu
min.	-	-	-	-	-	36-38	-	-	62-64
max.	0,1	0,1	0,05	0,1	0,3		0,03	-	

- **Bezkyšlíkatá med' (Cu-DHP)**

Bezkyšlíkatá med' sa vďaka vysokej tepelnej a elektrickej vodivosti, konzistencii, výbornej tváriteľnosti, zvariteľnosti a pájateľnosti vyžíva na náročnejšie priemyselné aplikácie. Jedná sa o med' vysokej čistoty (99,996%) s nízkym obsahom nečistôt. Jej tepelná vodivosť je najvyššia zo všetkých druhov medi. Pri zvarení mede vlhká atmosféra v mieste zvaru spôsobuje uvoľnenie vodíku z molekúl vody a jeho prenikanie do medi, čo vedie v kombinácii s kyslíkom k vodíkovému skrehnutiu zapríčiňujúcemu stratu mechanických vlastností a internú pórovitosť.

Voči tomuto javu je bezkyšlíkatá med' odolná, keďže neobsahuje kyslík.

Cu-DHP je bezkyšlíkatá med' s presne stráženou prísadou fosforu (0,015 až 0,040 hm.%) s výbornými vlastnosťami pre pájanie a zvaranie, so zvýšenou odolnosťou voči korózii.

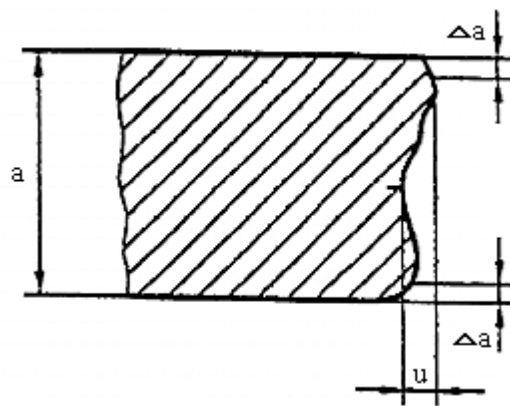
6 NORMA ČSN EN ISO 9013 [8], [15]

Norma ČSN EN ISO 9013 sa používa pre materiály vhodné na rezanie kyslíkovým plameňom, plazmou a laserom. Platí pre rezy plameňom od 3 do 300 mm, rezy plazmou od 1 do 150 mm a rezy laserom od 0,5 do 40 mm. Stanovuje úchylky tvaru, polohy a rozmeru, akosť povrchu rezu, tolerančné pole pre jednotlivé parametre, postup merania a vyhodnocovanie.

Pri meraní norma predpisuje vybrať také miesto rezu, na ktorom sú očakávané kritické hodnoty, no nebať na ňom viditeľné vady. Pred meraním je nutné merané miesto očistiť od oxidov. Pri meraní kolmosti rezu býva počet meraných miest a ich rozmiestnenie udané výrobcom, pokiaľ nie je, norma stanovuje meranie v dvoch sériách po troch meraniach vo vzdialenosti 20 mm na meter dĺžky rezu. V prípade merania drsnosti je stanovené jedno meranie na každý meter rezu.

- **Meranie kolmosti rezu**

Oblasť na ktorej sa stanoví úchylka kolmosti je zmenšená o malú vzdialenosť od hornej a dolnej hranice rezu (Δa) z dôvodu natavenia (obr. 29). Norma predpisuje pre presné meranie vodiace zariadenie s číselníkovým úchylkomerom a medznou chybou stanovenou na 0,02 mm. Pre hrubé meranie norma dovoľuje použiť príložný uholník, merací drôt, meradlo sklonu, uhlomer alebo listové medzerové mierky. Pri hrubom meraní dosahuje medzná chyba hodnotu 0,1 mm.



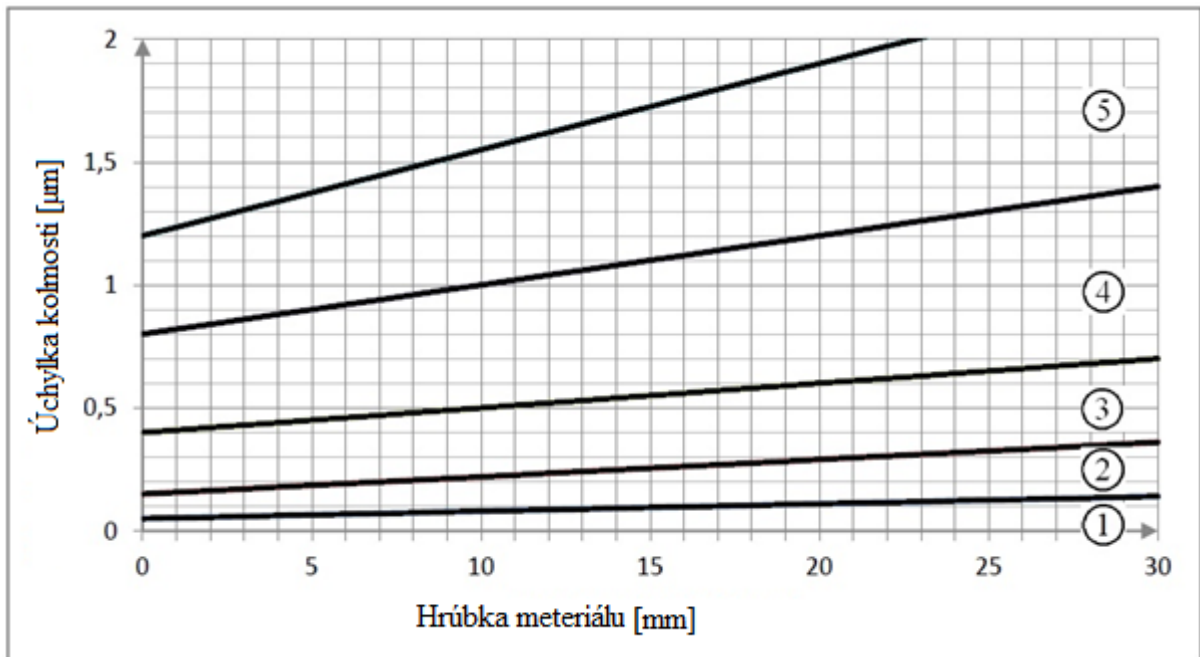
Obr. 29 Parametre kolmosti rezu [8]

- **Meranie drsnosti plochy rezu**

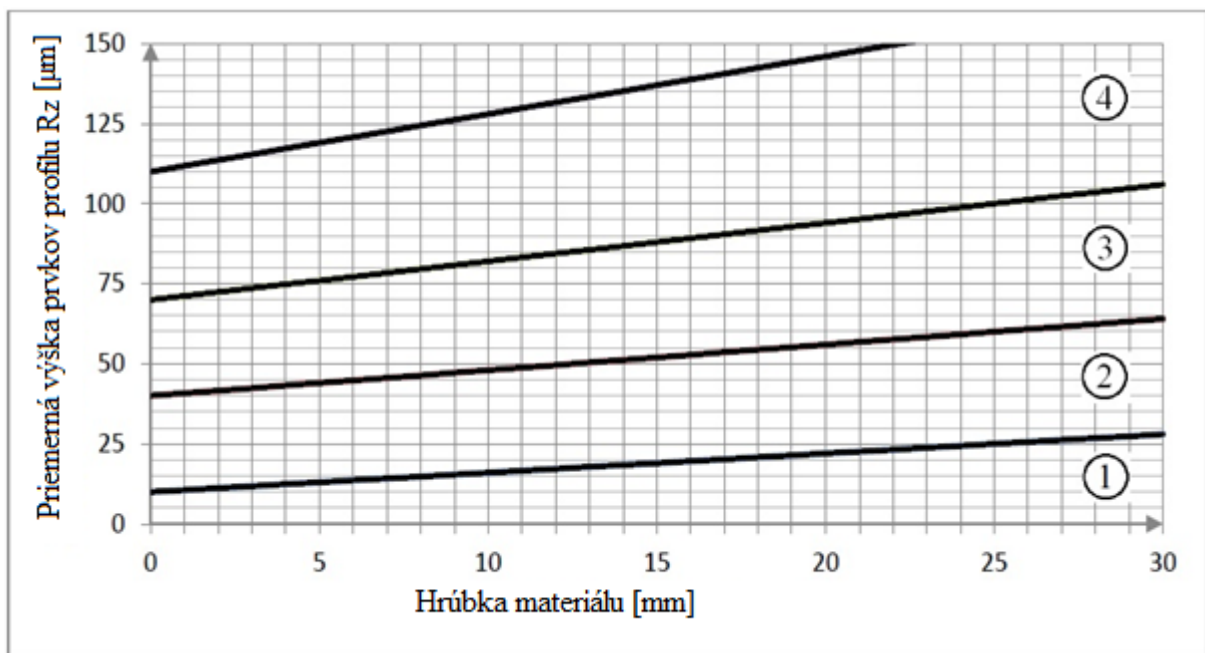
Pri meraní drsnosti rezných plôch norma predpisuje sledovať výšku profilu (Z_t – súčet výšky výstupku a priehlbiny sledovaného prvku profilu) a priemernú výšku prvkov profilu. (Pre meranie priemernej výšky prvkov profilu norma stanovuje pre rezanie kyslíkom a plazmou oblasť vo vzdialenosti $2/3$ hrúbky rezu od hornej reznej hrany a pre laserové rezanie oblasť prvej tretiny hrúbky od hornej reznej hrany. Meria sa v dĺžke 15 mm v smere posuvu horáku. Norma predpisuje ako meracie zariadenie pre presné meranie elektrický dotykový profilometer pre súvislé snímanie s medznou chybou 0,002 mm.

- **Akosť povrchu rezných plôch**

Na stanovenie akosti rezných plôch a ich kvality norma stanovuje pomocou priemernej výšky prvkov profilu ($Rz5$) a úchylky kolmosti, prípadne aj podľa hodnôt sklzu, natavenia hornej reznej hrany a výskytu otrepov na spodnej reznej hrane. Pre hodnoty úchylky kolmosti a priemernej výšky prvkov profilu sú v norme zahrnuté tabuľky, ktoré na základe týchto parametrov umožňujú zaradiť meraný vzorok do triedy tolerančného poľa pomocou grafov závislostí hodnôt úchylky kolmosti a $Rz5$ na hrúbke rezaného materiálu.



Obr. 30 Závislosť úchylky kolmosti na hrúbke materiálu [8]



Obr. 31 Závislosť úchylky kolmosti na hrúbke materiálu [8]

7 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ [8], [27]

Táto časť diplomovej práce pojednáva o praktických meraniach závislosti kvality rezných plôch na rezných parametroch ktorými sú výkon laseru, rezná rýchlosť, odstup trysky a poloha ohniskového bodu. Tieto merania boli vykonané vo firme HIWIN Motion and control systems na plechoch farebných kovov viacerých hrúbok. V nasledujúcich kapitolách bude popísaný typ laserového zariadenia na ktorom boli merania vykonané a metodika volenia rezných parametrov. Výsledné hodnoty drsností povrchov budú spracované a s pomedzi nich budú vybrané kombinácie rezných parametrov ktoré dosahujú najlepšiu kvalitu rezných hrán z kvalitatívneho a z ekonomického hľadiska.

7.1 Experimentálne laserové rezacie zariadenie FLC 080 [27]

Pri rezaní vzorkov pre experiment bolo použité experimentálne laserové zariadenie FeiCut FLC 0800. Zariadenie je napájané vláknovým Yb:YAG laserom YLS 5000 o výkone 5kW (obr.32). Veľkosť stola zariadenia je 800x800 mm.

Zariadenie sa vyznačuje tým, že posuvný pohyb reznej hlavy je zaistený lineárnym elektromotorom. Lineárny elektromotor je netočivý elektrický stroj bez akýchkoľvek rotujúcich súčastí. Na rozdiel od klasického elektromotora nevykonáva rotačný, ale posuvný pohyb. Jedná sa o mnohopólový motor, ktorého stator je rozvinutý do dĺžky. V porovnaní s mechanickými prevodmi, tradične používanými ako pohon rezných hláv dosahuje lineárny pohon omnoho vyššie zrýchlenia, čo má vplyv na zníženie rezných časov procesu rezania.

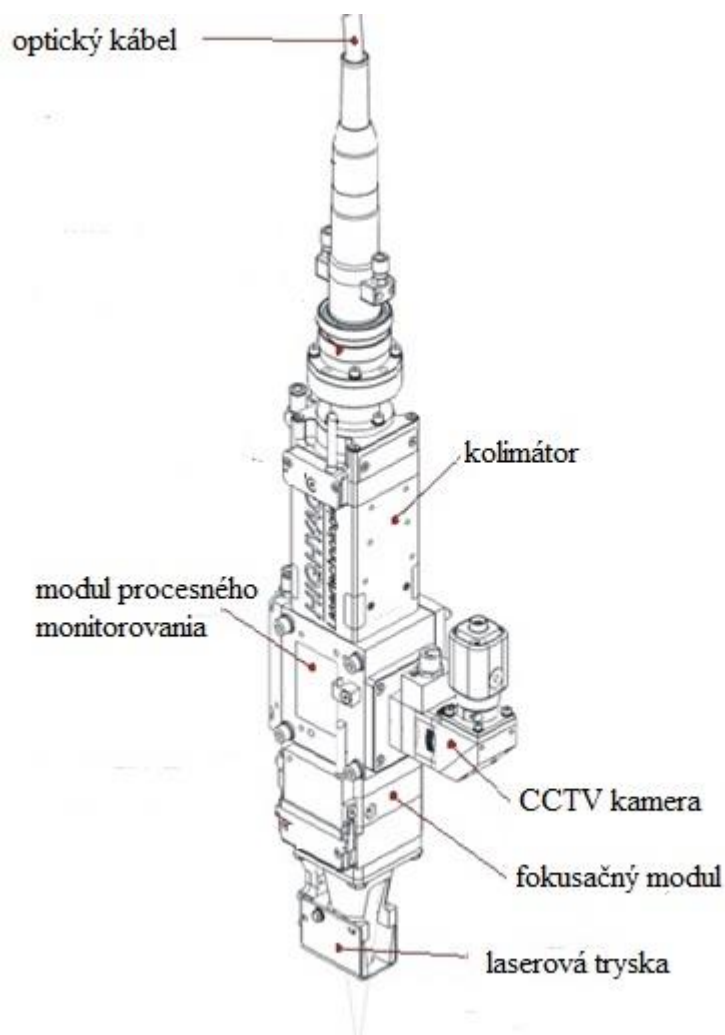
Laserové zariadenie je taktiež vybavené automatickým ochranným zariadením, ktoré v prípade, že spätne odrazené žiarenie prekročí určitú danú hodnotu, automaticky vypne zariadenie.



Obr. 32 Zariadenie FLC 0800 a laser YLS 5000

7.1.1 Rezná hlava HIGHYAG [21]

Pri rezaní vzorkov plechov z farebných kovov bola použitá hlava HIGHYAG BIMO FSC so spevneným ohniskom (obr. 33). Rezná hlava spĺňa požiadavky pre prácu s modernými diódovými, diskovými a vláknovými lasermi. Pracovná hlava môže byť nastavená na individuálne požiadavky daného rezaného materiálu, jej základné parameter sú uvedené v tab.3. Z dôvodu špecifických vlastností (vysoká tepelná vodivosť a odrazivosť) rezaných farebných kovov bola magnifikácia (zväčšenie) nastavené na hodnotu 1,1.



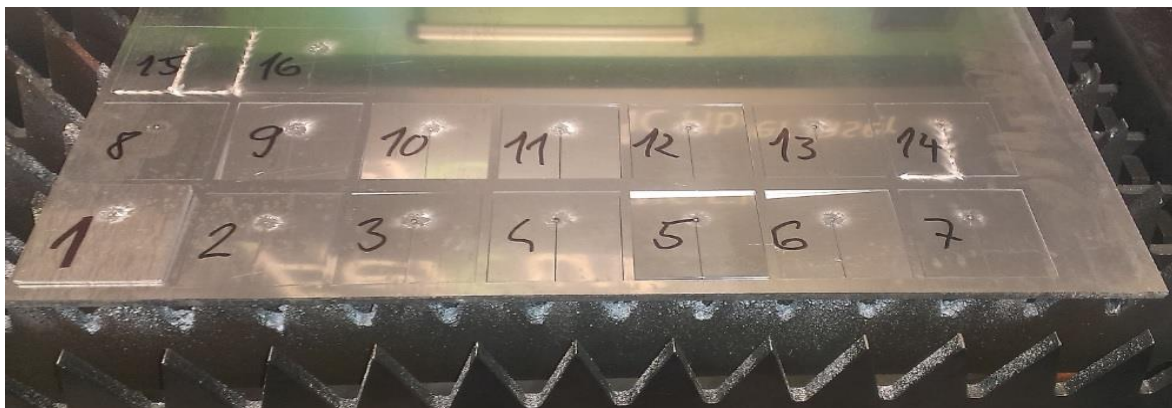
Obr. 33 Laserová rezná hlava HIGHYAG BIMO [21]

Tab. 3 Parametre reznej hlavy HIGHAYG BIMO [21]

Rezná hlava HIGHYAG BIMO	
Maximálny výkon laseru	6 kW
Vlnová dĺžka	1025 – 1080 nm
Priemer jadra optického kábla	10-1000 μm
Rozmery (šírka x hrúbka x výška)	312 x 90 x 682 mm
Váha	3,6 kg

7.2 Zisťovanie vplyvu rezných parametrov na kvalitu rezných plôch [8], [27]

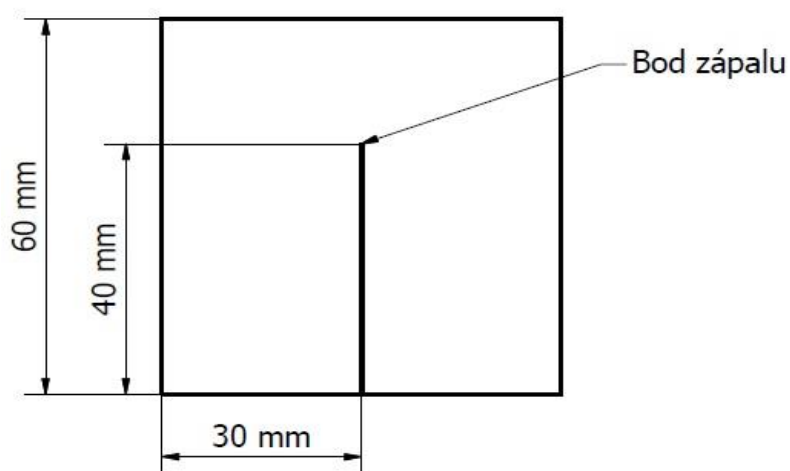
Vplyv rezných parametrov na kvalitu rezných plôch bol sledovaný na vzorkoch z bezkyslíkatej meďi, hliníku a mosadzi. Hrúbky medených a mosadzných plechov boli 1 a 2, a hliníkových plechov 2, 4 a 6 mm (obr. 34). Z každého plechu bolo vyrezaných 16 vzorkov pri rôznej kombinácii rezných parametrov. Samotné kombinácie rezných parametrov boli volené podľa Taguchiho metódy, popísanej v nasledujúcej podkapitole. Následne boli pomocou drsnomera a špárových mierok odmerané drsnosti Ra a Rz, a šírka spáry každého vzorku, výsledné hodnoty ako aj doporučenia sú uvedené v nasledujúcich podkapitolách.



Obr. 34 Plech z hliníku Al 99,5 s narezanými vzorkami

7.2.1 Návrh tvaru vzorku [27]

Ako tvar vzorku bol volený jednoduchý, v strede predelený štvorec. Tento tvar dovoľuje pre každú kombináciu parametrov preskúmať hodnoty drsností na viacerých na sebe nezávislých rezných hranách, rovnako ako aj šírku reznej medzery. Rozmery vzorku sú zobrazené na obr. 35.



Obr. 35 Náčrt rozmerov vzorku pre nasledovné rezanie

7.2.2 Taguchiho štatistické metódy [42], [43]

Taguchiho metódy patrí k štatistickým metódam zlepšovania kvality. Metódy sú tri: stratová funkcia, off-line kontrola a pojatie návrhu experimentov. V tejto práci je využitá metóda pojatia návrhu experimentov.

Táto metóda skúma interakciu medzi jednotlivými faktormi, ktoré môžu zhoršiť výslednú kvalitu výrobku. V prvom kroku sa presne definuje problém (v našom prípade drsnosť a kvalita rezných plôch) a faktory, ktoré tento problém ovplyvňujú. Následne sa stanoví veľkosť tzv. ortogonálneho poľa. Jedná sa o tabuľku ktorá vyznačuje vykonávanie experimentov kombinačnou metódou. Na rozdiel od faktorového experimentu nevyžaduje kombináciu všetkých parametrov, čo je veľmi časovo úsporné. V nasledujúcich tabuľkách je uvedený rozdiel Taguchiho metódy a metódy faktorového poľa pre tri faktory v dvoch úrovniach. Porovnanie počty potrebných experimentov pre obe metódy je uvedené v tab. 4 a tab. 5.

Tab. 4 Taguchiho ortogonálne pole pre 3 faktory v 2 úrovniach [43]

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
Experiment 1	1	1	1
Experiment 2	1	2	2
Experiment 3	2	1	2
Experiment 4	2	2	1

Tab. 5 Plné faktorové pole pre 3 faktory v 2 úrovniach [43]

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
Experiment 1	1	1	1
Experiment 2	1	2	2
Experiment 3	1	2	1
Experiment 4	1	1	2
Experiment 5	2	1	1
Experiment 6	2	1	2
Experiment 7	2	2	1
Experiment 8	2	2	2

Taguchiho metóda redukcie experimentov vedie k rýchlejšiemu, ľahšiemu a efektívnejšiemu získavaniu výsledkov pri návrhu experimentov. Taguchiho metóda niektoré experimenty vynecháva a z faktorového poľa vyberá iba presne dané experimenty. Ponechané sú najvýznamnejšie kombinácie rezných parametrov a je zaručené dostatočné štatistické porovnanie všetkých parametrov procesu.

7.2.3 Metodika merania drsnosti [24], [27], [28]

Meranie vzorkov prebehlo na Ústave prístrojové techniky AV ČR v Brne. Pri meraní bol použitý digitálny drsnomer Mahr MarSurf M300 a meracia jednotka Mahr MarSurf RD18

(obr. 36). Drsnomer bol zostavený, zapnutý a napoložovaný voči meranému vzorku upnutému vo zveráku. Každý vzorok bol upnutý v zveráku a boli na ňom vykonané tri merania drsnomerom na troch hranách pre zistenie hodnôt Ra a Rz, a následne bola odmeraná šírka reznej medzery pomocou špárových mierok. Podľa pravidiel normy ČSN EN ISO 9013 bolo meranie vykonané do prvej tretiny hrúbky od hornej reznej hrany v miestach, kde sa vizuálne dali predpokladať najväčšie hodnoty drsnosti na meranej dĺžke 1,75mm. Parametre drsnomeru sú uvedené v tab. 6.



Obr. 36 Drsnomer Mahr MarSurf M3000

Tab. 6 Parametre drsnomeru Mahr Marsurf M300 [24]

Parametre drsnomer Mahr Marsurf M300		
Posuvová rýchlosť	[mm/s]	0,5
Rozsah merania	[μm]	350
Rozlíšenie profilu	[μm]	90/180/350
Meraná dĺžka	[mm]	1,75/5,6/17,5
Merané parametre		Ra,Rz,Rq,Rmax.Rp,Rpk,Rk,Rvk,Rv,Rt
Rozlíšenie LCD obrazovky	[px]	320x240
Operačný rozsah teplôt	[$^{\circ}\text{C}$]	od 5 do 40

7.3 Tabuľky rezných parametrov a nameraných drsností [8], [27]

Pre každý materiál a hrúbku bolo zhotovených 16 vzorkov pri rôznych kombináciách parametrov a následne odmerané hodnoty drsnosti Ra a Rz a šírka reznej medzery. Pre vzorky, ktoré v dôsledku kombinácie parametrov (privysoká rezná rýchlosť a primalý výkon) alebo prvysokej odrazivosti materiálu neboli z materiálu správne vyrezané (zostali prichytené k tabuli plechu) nebolo potrebné uskutočniť meranie. Výsledné hodnoty sú zobrazené v nasledujúcich tabuľkách. U vzorkov, ktoré nemajú zaznamenané hodnoty drsností meranie neprebehlo, keďže kvôli kombinácii rezných parametrov (vysoká rezná rýchlosť, nízky výkon, vysoká odrazivosť materiálu) vzorky zostali zachytené v materiáli.

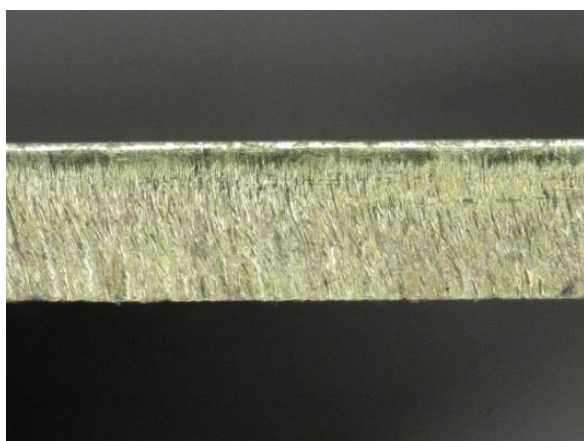
- **Mosadz CuZn37, hrúbka 1 mm**

Pri rezaní mosadzi o hrúbke 1 mm bol ako rezný plyn použitý dusík a tryska HK-15 o priemere 1,5 mm. Ako najväčšia prekážka sa ukázala odrazivosť materiálu pri polohe ohniska vyššej ako 2 mm. Po prekročení určitej hodnoty odrazeného žiarenia bol laser automaticky vypnutý. Použité rezné parametre, namerané hodnoty drsností a šírky rezných medzier sú zaznamenané v tab. 7.

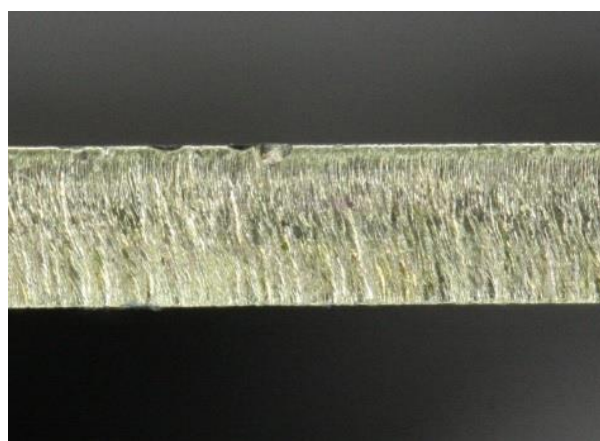
Tab. 7 Procesné parametre použité pri rezaní mosadzného plechu hrúbky 1 mm

Číslo merania	Výkon [W]	Rýchlosť [m/min]	Tlak [bar]	Poloha ohniska	Odst. trysky [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Šírka rez. m. [mm]
1	3000	20000	10	2	0,7	3,38±0,29	17,05±0,94	0,05
2	3500	25000	12	2,5	0,6			
3	2500	22500	14	3	0,8			
4	2000	17500	8	1,5	1	1,4±0,08	6,76±0,87	0,05
5	3500	20000	12	3	1			
6	3500	25000	10	1,5	0,8	2,52±0,4	12,05±1,59	0,05
7	3500	22500	8	2	0,6	4,09±0,69	20,15±1,79	0,05
8	3500	17500	14	2,5	0,7			
9	2500	20000	14	1,5	0,6	2,10±0,48	10,63±1,55	0,05
10	2500	25000	8	3	0,7			
11	2500	17500	12	2	0,8	3,3±0,52	15,67±2,14	0,05
12	2500	22500	10	2,5	1			
13	2000	20000	8	2,5	0,8			
14	2000	25000	14	2	1	2,52±0,5	12,22±1,48	0,05
15	2000	22500	12	1,5	0,7	1,82±0,08	9,09±0,29	0,05
16	2000	17500	10	3	0,6			

Z hľadiska kvality rezných hrán sa ukázala ako najlepšia kombinácia rezných parametrov použitých pri vzorku č.4 (obr. 38), z ekonomického hľadiska zas kombinácia parametrov použitých pri vzorku č.15 (obr. 37) keďže vzorok pri vyššej reznej rýchlosti vykazoval vysokú kvalitu rezných hrán bez otrepov a pittingu.



Obr. 37 Rezná hrana vzorku č.15



Obr. 38 Rezná hrana vzorku č.4

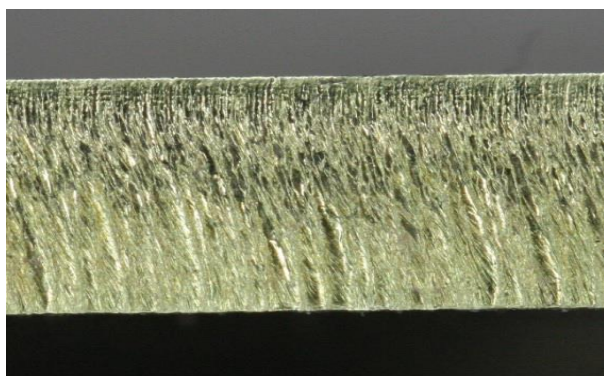
- **Mosadz CuZn37, hrúbka 2 mm (použitá tryska HK-17)**

Pri rezaní mosadze o hrúbke 2 mm bol ako rezný plyn použitý dusík a tryska HK-17 o priemere 1,7 mm. Merania č.14 a 15 neboli uskutočnené, keďže už vzorok č.13, ktorý zostal zatavený v materiáli, ukázal, že pri výkone 2000 W je pre túto hrúbku medi rezná rýchlosť nad 7000 m/min príliš vysoká. Použité rezné parametre, namerané hodnoty drsností a šírky rezných medzier sú zaznamenané v tab. 8.

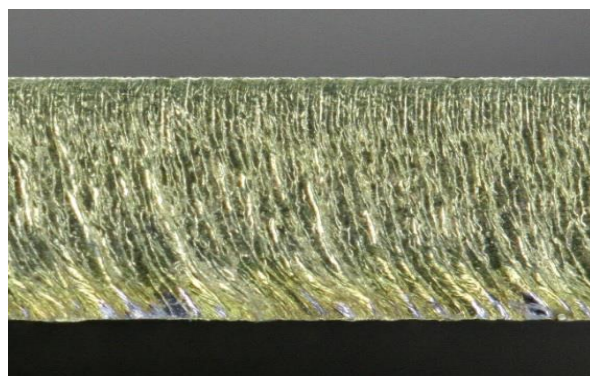
Tab. 8 Procesné parametre použité pri rezaní mosadzného plechu hrúbky 2 mm

;	Výkon [W]	Rýchlosť [m/min]	Tlak [bar]	Poloha ohniska	Odstup trysky [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Šírka rez. medzery [mm]
1	3000	7000	13	2	0,7	4,24±0,37	19,59±1	0,1
2	3000	10000	14	1,5	0,6	3,2±0,29	14,93±1,13	0,1
3	3000	8000	12	1	0,8	3,23±0,64	15,08±1,93	0,1
4	3000	5000	10	2,5	1			
5	3500	7000	14	1	1	2,64±0,69	13,49±3,43	0,1
6	3500	10000	13	2,5	0,8			
7	3500	8000	10	2	0,6	4,59±0,69	21,93±4,09	0,1
8	3500	5000	12	1,5	0,7	3,2±0,39	15,81±1,4	0,1
9	2500	7000	12	2,5	0,6			
10	2500	10000	10	1	0,7			
11	2500	8000	13	1,5	1	2,72±0,58	13,33±2,18	0,1
12	2500	5000	14	2	0,8	3,08±0,17	15,59±0,95	0,1
13	2000	7000	10	1,5	0,8			
14	2000	8000						
15	2000	10000						
16	2000	5000	10	1,0	0,6	2,76±0,3	12,56±1,04	0,1

Z hľadiska kvality rezných hrán sa ukázala ako najlepšia kombinácia parametrov použitých pri vzorku č. 16 (obr. 40), z ekonomického hľadiska zas kombinácia parametrov použitých pri vzorku č.5 (obr. 39), ktorý pri najvyššej spomedzi volených rezných rýchlostí vykazoval vysokú kvalitu rezných hrán bez otrepov a pittingu.



Obr. 39 Rezná hrana vzorku č.5



Obr. 40 Rezná hrana vzorku č.16

- **Meď Cu-DHP, hrúbka 1 mm – oxidačné rezanie**

Pri rezaní medi hrúbky 1 mm bol použitý ako procesný plyn kyslík a tryska HK-17 o priemere 1,7 mm. Problémy z odrazivosťou ani nevhodnou kombináciou rezných parametrov nenastali, podarilo sa úspešne vyrezať všetky vzorky bez zatavenia. Použité rezné parametre, namerané hodnoty drsností a šírky rezných medzier sú zaznamenané v tab. 9.

Tab. 9 Procesné parametre použité pri rezaní medeneho plechu hrúbky 1 mm

Číslo merania	Výkon [W]	Rýchlosť [m/min]	Tlak [bar]	Poloha ohniska	Odst. trysky [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Šírka rez. medzery [mm]
1	3000	20000	8	2	0,5	2,23±0,74	12,09±3,8	0,1
2	3000	22500	9	1,5	0,6	2,47±0,83	12,7±2,26	0,15
3	3000	25000	7	1	0,7	3,21±0,85	15,19±2,98	0,1
4	3000	17500	6	2,5	0,8	2,68±0,9	13,32±5,23	0,1
5	3500	20000	9	1	0,8	2,49±0,68	13,12±3,03	0,15
6	3500	22500	8	2,5	0,7	2,58±0,46	13,32±2,1	0,1
7	3500	25000	6	2	0,6	2,89±0,14	14,51±1,42	0,1
8	3500	17500	7	1,5	0,5	2,83±0,45	14,47±1,15	0,15
9	2750	20000	7	2,5	0,6	2,36±0,23	12,98±0,89	0,15
10	2750	22500	6	1	0,5	3,29±0,64	15,16±2,93	0,15
11	2750	25000	8	1,5	0,8	2,32±0,1	12,57±0,96	0,15
12	2750	17500	9	2	0,7	2,44±0,03	12,63±0,75	0,1
13	2500	20000	6	1,5	0,7	2,99±0,56	14,39±2,19	0,1
14	2500	22500	7	2	0,8	2,49±0,1	13,02±0,15	0,15
15	2500	25000	9	2,5	0,5	1,85±0,27	9,41±1,37	0,15
16	2500	17500	8	1,0	0,6	2,53±0,8	12,36±4,75	0,15

Z hľadiska kvality rezných hrán sa ukázala ako najlepšia kombinácia parametrov použitých pri vzorku č. 16 (obr. 41), ktorá je najlepšia aj z hľadiska ekonomického, keďže v nej figuruje najvyššia spomedzi volených rezných rýchlostí.



Obr. 41 Rezná hrana vzorku č. 16

- **Meď Cu-DHP, hrúbka 2 mm – oxidačné rezanie**

Pri rezaní hrúbky medi hrúbky 1 mm bol použitý ako procesný plyn kyslík a tryska HK-20 o priemere 2 mm. Meranie č. 15 nebolo vykonané, keďže ako ukázalo merania č.13 a č.14, pre hrúbku medi 2 mm je výkon laseru 2800 W nedostačujúci, čo potvrdilo aj meranie č. 16, keď aj pri najnižšej spomedzi volených rezných rýchlostí zostal vzorok zatavený v materiáli. Použité rezné parametre, namerané hodnoty drsností a šírky rezných medzier sú zaznamenané v tab.10.

Tab. 10 Procesné parametre použité pri rezaní medeného plechu hrúbky 2 mm

Číslo merania	Výkon [W]	Rýchlosť [m/min]	Tlak [bar]	Poloha ohniska	Odst. trysky [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Šírka rez. medzery [mm]
1	3000	8600	8	3	0,5	2,29±0,21	10,96±1,6	0,15
2	3000	9200	9	2,5	0,6	2,52±0,21	12,68±1,58	0,1
3	3000	9800	7	2	0,7			
4	3000	8000	6	1,5	0,8			
5	3400	8600	9	2	0,8	2,26±0,25	10,62±1,4	0,1
6	3400	9200	8	1,5	0,7			
7	3400	9800	6	3	0,6	2,15±0,65	10,59±3,82	0,15
8	3400	8000	7	2,5	0,5	2,46±0,38	11,84±1,75	0,1
9	3800	8600	7	1,5	0,6	2,5±0,48	11,8±3,03	0,15
10	3800	9200	6	2	0,5	2,39±0,46	12,21±2,88	0,15
11	3800	9800	8	2,5	0,8	2,08±0,53	10,16±2,89	0,15
12	3800	8000	9	3	0,7	2,25±0,14	11,1±0,67	0,15
13	2800	8600	6	2,5	0,7			
14	2800	9200	7	3	0,8			
15	2800	9800						
16	2800	8000	8	2	0,6			

Z hľadiska kvality rezných hrán sa ukázala ako najlepšia kombinácia parametrov použitých pri vzorku č. 11 (obr. 42), ktorá je najlepšia aj z hľadiska ekonomického, keďže v nej figuruje najvyššia spomedzi volených rezných rýchlostí.



Obr. 42 Rezná hrana vzorku č. 11

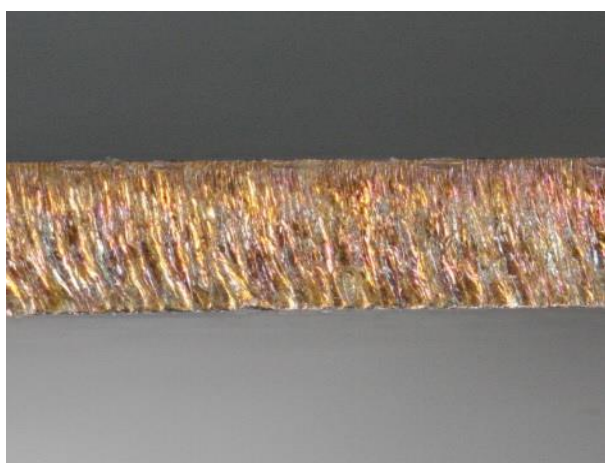
- **Med' Cu-DHP, hrúbka 1 a 2 mm – pracovný plyn stlačený vzduch**

Pre medené plechy bol vykonaný ďalší experiment, pri ktorom bol namiesto kyslíku použitý ako rezný plyn dusík a stlačený vzduch, hnaný pod vysokým tlakom (10 až 12 bar). Pri použití dusíku ako procesného plynu sa ukázala ako prekážka rezaniu vysoká odrazivosť materiálu, keďže povrch nebol vopred zoxidovaný kyslíkom do tej miery, aby odrazené žiarenie nebolo tak vysoké aby prinútilo automatickú ochranu laseru zariadenie vypnúť. Pri použití dusíku sa teda nepodarilo úspešne vyrezať žiadne vzorky. Pri použití stlačeného vzduchu ako procesného plynu už odrazivosť nehrala tak významnú úlohu ako pri použití dusíku a boli zhotovené 2 vzorky pre každú hrúbku medeného plechu pre porovnanie so vzorkami získanými oxidačným rezaním.

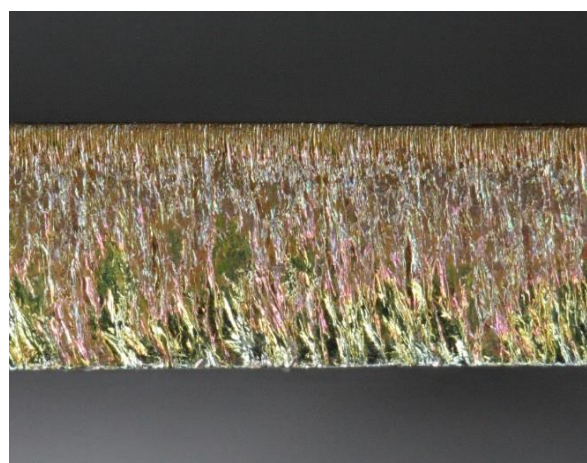
Tab. 11 Procesné parametre použité pri rezaní medených plechu hrúbky 1 a 2 mm za použitia vzduchu ako procesného plynu.

Číslo merania	Výkon [W]	Rýchlosť [m/min]	Tlak [bar]	Poloha ohniska	Odst. trysky [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Š.reznej medzery [mm]
Med' hrúbka 1 mm								
1	3900	15000	10	2	0,7	2,35±0,49	11,81±2,0	0,1
2	3900	13000	10	2	0,7	2,76±0,19	13,37±0,51	0,1
Med' hrúbka 2 mm								
1	4000	8600	12	3	0,5	2,89±0,41	17,4±5,89	0,1
2	3000	9200	12	3	0,5	3,2±0,68	14,99±2,5	0,1

Zo vzorkov rezaných z medeného plechu hrúbky 1mm vykazuje lepšie hodnoty drsností vzorok č.1 (obr. 43) a zo vzorkov rezaných s medeného plechu hrúbky 2 mm vzorok č.2 (obr. 44). U oboch vybraných vzorkov boli zároveň použité najvyššie rezné rýchlosti spomedzi ostatných.



Obr. 43 Rezná hrana vzorku č. 1



Obr. 44 Rezná hrana vzorku č. 2

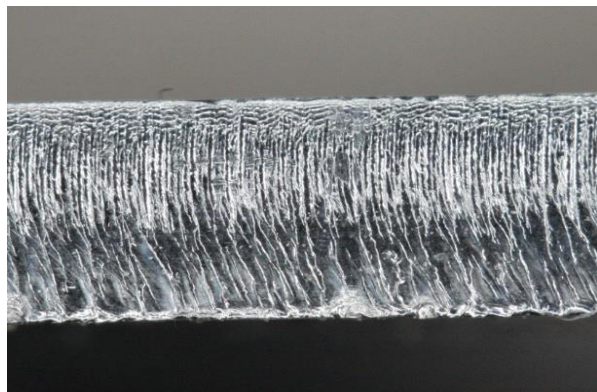
- **Hliník Al 99,5, hrúbka 2 mm**

Pri rezaní hliníku o hrúbke 2 mm bol použitý ako procesný plyn dusík a tryska HK-20 o priemere 2 mm. Vzorky pri meraniach č.8 č.10 a č.11 zostali zatavené v materiáli. Použité rezné parametre, namerané hodnoty drsností a šírky rezných medzier sú zaznamenané v tab. 12 .

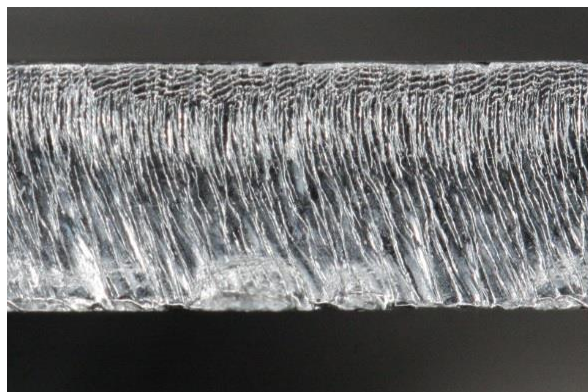
Tab. 12 Procesné parametre použité pri rezaní hliníkového plechu hrúbky 2 mm

Č. merania	Výkon [W]	Rýchlosť [m/min]	Tlak [bar]	Poloha ohniska	Odst. trysky [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Šírka rez. medzery [mm]
1	3000	8000	12	2	1	3,02±0,25	14,9±2,75	0,15
2	3000	8500	14	2,5	0,7	3,51±0,07	15,95±1,13	0,1
3	3000	9000	16	3	1,5	3,05±0,51	13,81±2,27	0,1
4	3000	7500	10	1,5	2	2,38±0,11	13,81±2,27	0,15
5	3400	8000	14	3	2	2,76±0,85	12,54±2,97	0,15
6	3400	8500	12	1,5	1,5	1,93±0,33	8,79±1,31	0,15
7	3400	9000	10	2	0,7	3,31±0,29	15,49±2,17	0,15
8	3400	7500	16	2,5	1			
9	3800	8000	16	1,5	0,7	2,84±0,37	13,64±1,84	0,15
10	3800	8500	10	3	1			
11	3800	9000	12	2,5	2			
12	3800	7500	14	2	1,5	2,53±0,15	12,34±1,21	0,15
13	2800	8000	10	2,5	1,5	2,42±0,23	10,89±1,2	0,15
14	2800	8500	16	2	2	1,62±0,19	7,75±1,22	0,15
15	2800	9000	14	1,5	1	1,94±0,3	9,98±1,65	0,15
16	2800	7500	12	3,0	0,7	3,06±0,12	15,4±0,21	0,15

Z hľadiska kvality rezných hrán sa ako najlepšia javí kombinácia rezných parametrov použitých pri vzorku č.15 (obr. 46), z ekonomického hľadiska zas kombinácia parametrov použitých pri vzorku č.6 (obr. 45), ktorý pri najvyššej spomedzi volených rezných rýchlostí vykazoval vysokú kvalitu rezných plôch. Pri všetkých rezaných vzorkoch bol prítomný mierny ostrý otrep.



Obr. 45 Rezná hrana vzorku č. 6



Obr. 46 Rezná hrana vzorku č. 15

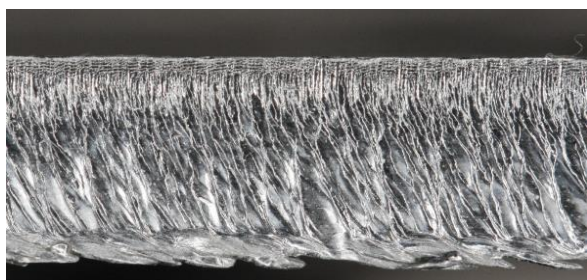
- **Hliník Al 99,5, hrúbka 4 mm**

Pri rezaní hliníku o hrúbke 4 mm bol použitý ako procesný plyn dusík a tryska HK-25 o priemere 2,5 mm. Meranie č.14 nebolo uskutočnené, keďže ako ukázalo meranie č.13, pri výkone laseru 2800 W je rezná rýchlosť nad 4800 m/min príliš vysoká, a vzorok zostane zatavený v materiáli. Použité rezné parametre, namerané hodnoty drsností a šírky rezných medzier sú zaznamenané v tab. 13.

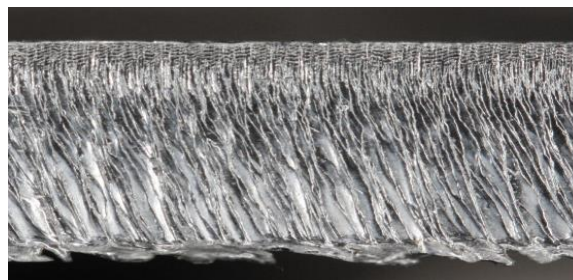
Tab. 13 Procesné parametre použité pri rezaní hliníkového plechu hrúbky 4 mm

Číslo merania	Výkon [W]	Rýchlosť [m/min]	Tlak [bar]	Poloha ohniska	Odst. trysky [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Šírka rez. medzery [mm]
1	3000	4800	15	1,5	1	3,18±0,2	14,46±1,49	0,1
2	3000	5000	16	2	0,8	4,01±0,5	17,79±1,58	0,1
3	3000	4600	14	2,5	1,2	4,24±0,2	19,28±1	0,1
4	3000	4400	13	3	1,4	3,32±0,33	15,39±0,57	0,1
5	3400	4800	16	2,5	1,4	3,86±0,15	17,73±0,92	0,1
6	3400	5000	15	3	1,2	4,12±0,92	20,24±4	0,1
7	3400	4600	13	1,5	0,8	3,29±0,44	16,22±1,51	0,1
8	3400	4400	14	2	1	3,3±0,36	15,87±2,34	0,1
9	3800	4800	14	3	0,8	4,25±1,09	19,17±1,83	0,1
10	3800	5000	13	2,5	1	3,91±0,31	17,58±1,89	0,1
11	3800	4600	15	2	1,4	2,75±0,29	12,74±0,38	0,1
12	3800	4400	16	1,5	1,2	2,94±0,83	13,85±3,76	0,1
13	2800	4800	13	2	1,2			
14	2800	5000						
15	2800	4600	16	3	1	3,67±0,54	16,38±2,84	0,1
16	2800	4400	15	2,5	0,8	3,99±0,53	17,69±1,78	0,1

Z hľadiska kvality rezných hrán sa ako najlepšia javí kombinácia rezných parametrov použitých pri vzorku č.12 (obr. 48), z ekonomického hľadiska zas kombinácia parametrov použitých pri vzorku č.11 (obr. 47), ktorý pri najvyššej spomedzi volených rezných rýchlostí vykazoval vysokú kvalitu rezných plôch. Pri všetkých rezaných vzorkoch bol prítomný mierny ostrý otrep.



Obr. 47 Rezná hrana vzorku č. 11



Obr. 48 Rezná hrana vzorku č. 12

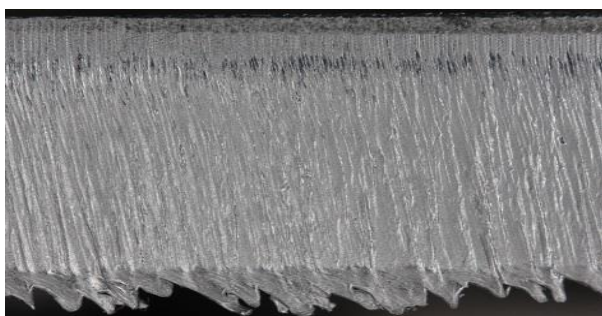
- **Hliník Al 99,5, hrúbka 6 mm**

Pri rezaní hliníku o hrúbke 6 mm bol použitý ako procesný plyn dusík a tryska HK-25 o priemere 3 mm. Pri meraniach č.13, č.14 a č.15 zostali vzorky zatavené v materiáli, keďže pri výkone laseru 2800 W je rezná rýchlosť nad 2000 m/min príliš vysoká. Použité rezné parametre, namerané hodnoty drsností a šírky rezných medzier sú zaznamenané v tab.14.

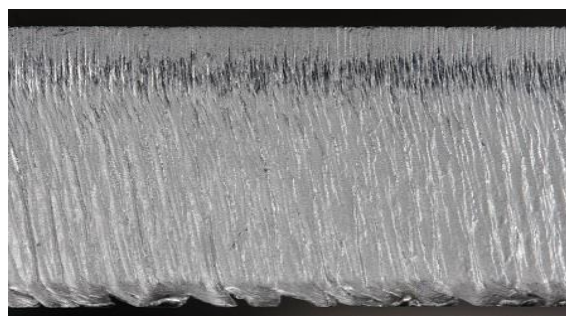
Tab. 14 Procesné parametre použité pri rezaní hliníkového plechu hrúbky 6 mm

Číslo merania	Výkon [W]	Rýchlosť [m/min]	Tlak [bar]	Poloha ohniska	Odst. t [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Šírka rez. medzery [mm]
1	3000	2300	15	1	1	2,56±0,41	11,79±1,47	0,1
2	3000	2500	14	1,5	0,8	3,37±0,4	14,86±1,93	0,1
3	3000	2700	16	2	0,6	3,66±0,98	16,55±3,68	0,1
4	3000	2000	13	0,5	1,2	3,44±0,65	16,9±4,63	0,15
5	3400	2300	14	2	1,2	3,37±0,99	14,92±4,13	0,15
6	3400	2500	15	0,5	0,6	2,78±1,22	12,8±5,85	0,15
7	3400	2700	13	1	0,8	3,05±0,35	13,44±1,52	0,2
8	3400	2000	16	1,5	1	3,96±0,3	17,68±2,18	0,1
9	3800	2300	16	0,5	0,8	2,96±0,41	13,84±1,06	0,1
10	3800	2500	13	2	1	3,69±0,66	16,13±3,04	0,15
11	3800	2700	15	1,5	1,2	3,01±0,66	13,23±2,59	0,15
12	3800	2000	14	1	0,6	3,12±0,71	14,44±4,22	0,15
13	2800	2300	13	1,5	0,6			
14	2800	2500	16	1	1,2			
15	2800	2700	14	0,5	1			
16	2800	2000	15	2	0,8	4±0,34	19,73±3,36	0,1

Z hľadiska drsnosti rezných hrán sa ako najlepšia javí kombinácia rezných parametrov použitých pri vzorku č.9 (obr. 49). Meranie č.11 (obr. 50) pri najvyššej spomedzi volených rezných rýchlostí, a ostrý otrep na rezných hranách vzorku nie je taký výrazný ako pri vzorku č.9, preto sa kombinácia rezných parametrov pri tomto meraní javí ako ekonomicky aj kvalitatívne najvýhodnejšia.



Obr. 5 Rezná hrana vzorku č. 9



Obr. 50 Rezná hrana vzorku č. 11

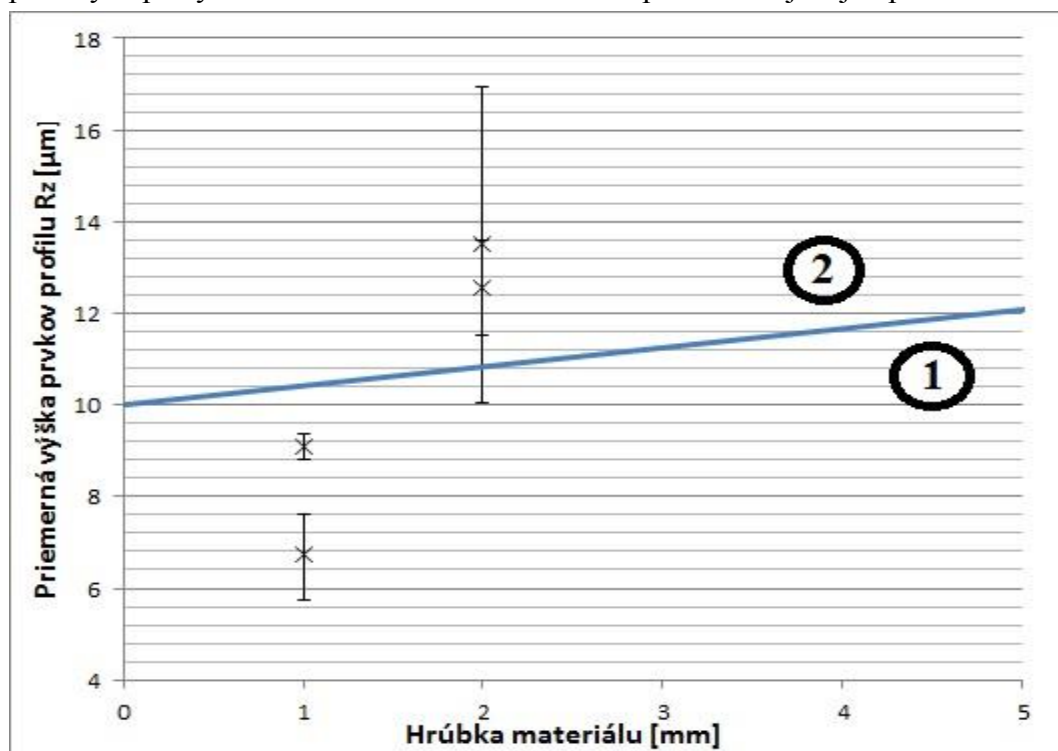
8 ZARADENIE NAMERANÝCH DRSNOSTÍ DO TRIED PODĽA NORMY ČSN EN ISO 9013 [8], [27]

Na stanovenie akosti rezných plôch a ich kvality norma ČSN EN ISO 9013 stanovuje triedy presnosti, určené pomocou závislosti priemernej výšky prvkov profilu (Rz) a hrúbky rezaného materiálu. Pre určenie triedy presnosti meraného vzorku sa tieto dve hodnoty vynesú do grafu závislosť parametru drsnosti Rz na hrúbke rezaného materiálu.

Grafy boli zhotovené pre všetky rezné materiály. Hodnota drsnosti Rz pri danej hrúbke materiálu je znázornená bodom, jej smerodajnú odchýlku vyjadruje predĺženie vo vertikálnom smere.

8.1 Zaradenie vzorkov mosadze do tried drsnosti [8]

Pre obe hrúbky mosadzných plechov boli vybrané dva vzorky, dosahujúce najlepšie výsledky z ekonomického a kvalitatívneho hľadiska. Presné hodnoty rezných parametrov použitých pri týchto vzorkoch sú zaznamenané v predchádzajúcej kapitole.

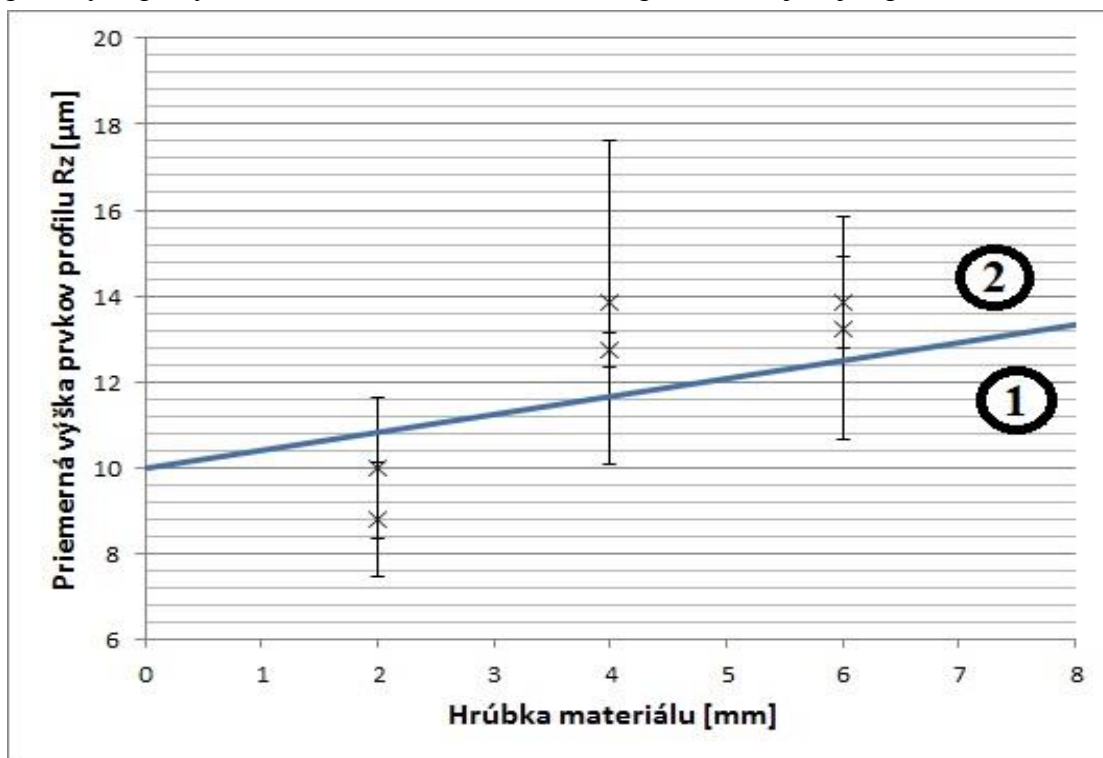


Obr. 51 Zaradenie vzorkov mosadze do tried drsnosti

Z grafu (obr. 51) vyplýva, že vzorky mosadze o hrúbke 1 mm spadajú do triedy presnosti 1, zatiaľ čo vzorky hrúbky 2 mm spadajú do triedy presnosti 2 (vzorok č.5 vďaka vysokej sa vďaka vysokej smerodajnej odchýlke nachádza na rozhraní tried 1 a 2). Kvalita reznej hrany je závislá od hrúbky rezaného materiálu, a so zvyšujúcou sa hrúbkou sa zväčšuje aj drsnosť rezných hrán.

8.2 Zaradenie vzorkov hliníku do tried drsnosti [8]

Pre každú hrúbku rezaných plechov boli vybrané dva vzorky, dosahujúce najlepšie výsledky z ekonomického a kvalitatívneho hľadiska. Presné hodnoty rezných parametrov použitých pri týchto vzorkoch sú zaznamenané v predchádzajúcej kapitole.

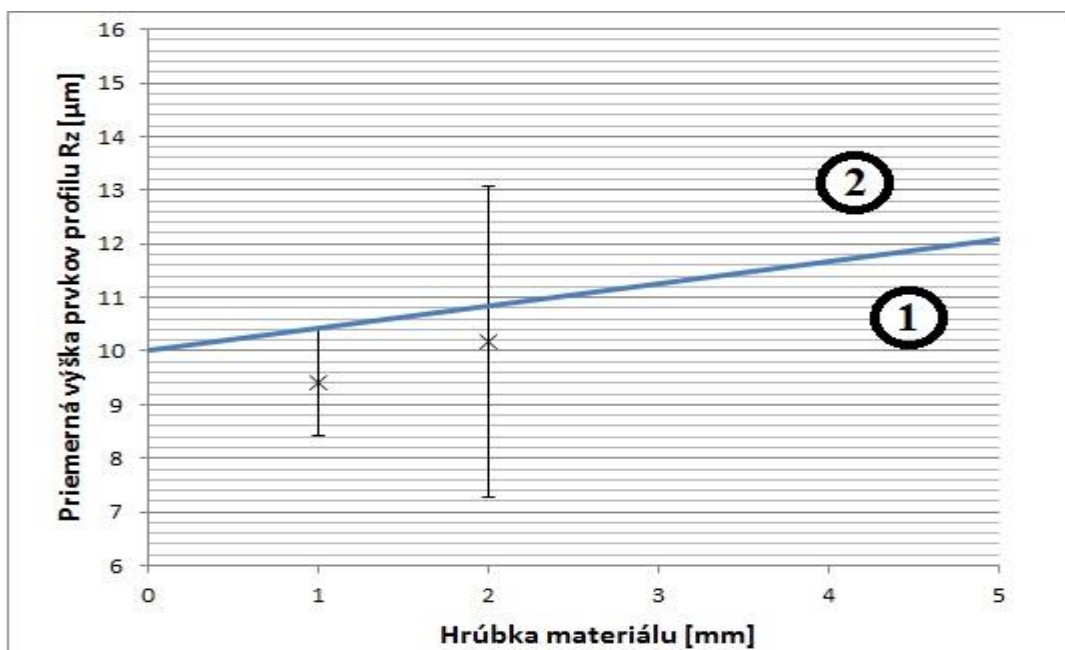


Obr. 52 Zaradenie vzorkov hliníku do tried drsnosti

Z grafu (obr. 52) vyplýva, že vzorky hliníku o hrúbke 2 mm spadajú do triedy presnosti 1 (vzorok č.11 sa vďaka vysokej smerodajnej odchyтке nachádza na rozhraní 1 a 2 triedy presnosti), vzorky hrúbky 4mm s sa vďaka vysokej smerodajnej odchyтке nachádza na rozhraní tried 1 a 2., rovnako ako aj vzorky o hrúbke 6 mm. Vplyv hrúbky materiálu sa ukázal hlavne na vyššej kvalite rezných hrán na vzorkoch o hrúbke 2 mm, no pri vyšších hrúbkach hliníkového plechu (4 a 6 mm) zostala kvalita plôch porovnateľne rovnaká.

8.3 Zaradenie vzorkov medi do tried presnosti [8]

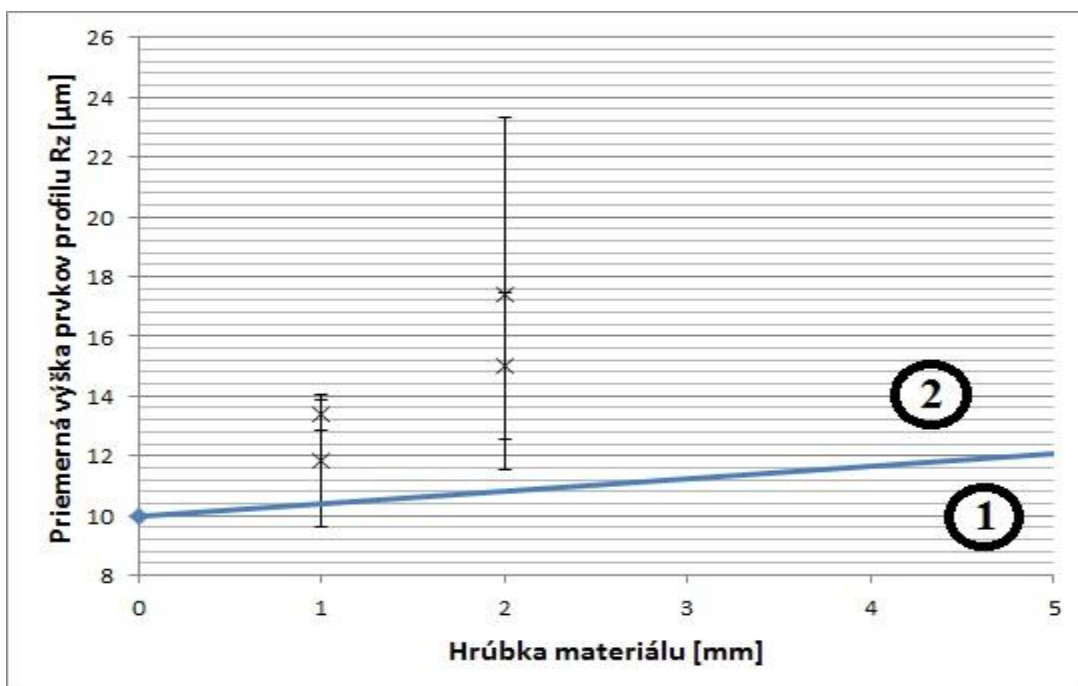
Pre každú hrúbku plechu z bezkyslíkovej medi bol vybraný jeden vzorek, keďže, ako sa uvádza v predchádzajúcej kapitole, vzorek s najvyššou kvalitou rezných hrán sa v oboch prípadoch ukázal aj ako najekonomickejšia voľba vzhľadom na reznú rýchlosť. Presné hodnoty rezných parametrov použitých pri týchto vzorkoch sú zaznamenané v predchádzajúcej kapitole.



Obr. 53 Zaradenie vzorkov medi do tried drsnosti

Z grafu (obr. 53) vyplýva, že vzorky medi o hrúbke 1 mm spadajú do triedy presnosti 1, zatiaľ čo vzorky hrúbky 2 mm sa vďaka vysokej smerodajnej odchylke nachádzajú na rozhraní tried 1 a 2. Kvalita reznej hrany je závislá od hrúbky rezaného materiálu, a so zvyšujúcou sa hrúbkou sa zväčšuje aj drsnosť rezných hrán.

Pre porovnanie bolo vykonané taktiež rezanie bezkyslíkatej medi za použitia stlačeného vzduchu ako procesného plynu namiesto dusíku. Presné hodnoty rezných parametrov použitých pri týchto vzorkoch sú zaznamenané v predchádzajúcej kapitole.



Obr. 54 Zaradenie vzorkov medi rezanej za použitia stlačeného vzduchu do tried presnosti

Z grafu vyplýva (obr. 54) , že všetky štyri vzorky spadajú do triedy drsnosti 2. (s výnimkou vzorku č.2 hrúbky 1mm, ktorý sa nachádza na rozhraní tried presnosti 1. a 2.) V porovnaní so vzorkami pri ktorých rezaní bol ako pracovný plyn použitý kyslík dopadli vzorky rezané za použitia stlačeného vzduchu výrazne horšie.

9 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE [27]

V predchádzajúcich kapitolách bol pre každý materiál vyrobených 16 vzorkov za použitia kombinácie rezných parametrov podľa Taguchiho metódy. Spomedzi týchto vzorkov boli vybraté dva vzorky, jeden ktorý dosahoval najlepšie hodnoty drsností rezných hrán a druhý, ktorý dosahoval prípustné hodnoty drsnosti pri čo najvyššej reznej rýchlosti. Tieto vzorky boli následne zatriedené do tried presnosti podľa normy ČSN EN ISO 9013. V kapitole technicko-ekonomické zhodnotenie budú porovnané tieto dva vzorky pre každý materiál, s dôrazom na reznú rýchlosť, ktorá je z ekonomického hľadiska najdôležitejším parametrom laserového rezania. Hodinové náklady na prevádzku laseru sa uvažujú 2500 Kč.

$$n = \frac{2500}{60 \cdot v_c}, \quad (1)$$

kde: n – náklady na 1 meter rezu [Kč]
 v_c – rezná rýchlosť [m/min]

• Mosadz hrúbky 1 mm

Pri vzorkoch mosadze hrúbky 1 mm bol z hľadiska najlepšej kvality rezných hrán vybraný vzorok č.4, ktorý pri reznej rýchlosti 17500 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 6,76 \pm 0,72\ \mu\text{m}$. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,0024 Kč. Z ekonomického hľadiska sa však ukázal najlepší vzorok č.15, ktorý pri reznej rýchlosti 22500 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 9,09 \pm 0,29\ \mu\text{m}$. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,0019 Kč. Ako je patrné z grafu v predchádzajúcej kapitole, oba vzorky sa radia do triedy presnosti 1. Z toho vyplýva, že pre praktické použitie je výhodnejšia kombinácia rezných parametrov použitá pri vzorku č.15.

• Mosadz hrúbky 2 mm

Pri vzorkoch mosadze hrúbky 2 mm bol z hľadiska najlepšej kvality rezných hrán vybraný vzorok č.5, ktorý pri reznej rýchlosti 5000 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 12,56 \pm 1,04\ \mu\text{m}$. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,0083 Kč. Z ekonomického hľadiska sa však ukázal najlepší vzorok č.16, ktorý pri reznej rýchlosti 7000 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 13,49 \pm 3,43\ \mu\text{m}$. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,006 Kč. Ako je patrné z grafu v predchádzajúcej kapitole, oba vzorky sa radia do triedy presnosti 2. Z toho vyplýva, že pre praktické použitie je výhodnejšia kombinácia rezných parametrov použitá pri vzorku č.16, keďže hodnoty drsností sa líšia minimálne.

• Med' hrúbky 1 mm – oxidačné rezanie

Pri vzorkoch medi hrúbky 1 mm bol z hľadiska najlepšej kvality rezných hrán vybraný vzorok č.15, ktorý pri reznej rýchlosti 25000 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 9,41 \pm 1,37\ \mu\text{m}$. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,0017 Kč. Tento vzorok sa ukázal ako najlepší voľba aj z ekonomického hľadiska,

keďže rýchlosť 25000 m/min je najvyššia spomedzi volených rezných rýchlostí.. Ako je patrné z grafu v predchádzajúcej kapitole, vzorok spadá do triedy presnosti 1.

- **Meď hrúbky 1 mm – pracovný plyn stlačený vzduch**

Pri vzorkoch medi hrúbky 1 mm pri rezaní za pomoci stlačeného vzduchu boli zhotovené len dva vzorky pre porovnanie so vzorkami zhotovenými oxidačným rezaním. Z hľadiska najlepšej kvality rezných hrán a rovnako aj najvyššej reznej rýchlosti bol vybraný vzorok č.1, ktorý pri reznej rýchlosti 15000 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 11,81 \pm 2\mu m$. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,0028 Kč. V porovnaní so vzorkom získaným oxidačným rezaním je patrné, že vzorok pri výrazne nižšej reznej rýchlosti dosiahol mierne vyšších hodnôt drsností a náklady na jeden meter rezu budú vššie takmer o tretinu. Z toho vyplýva, že ako po ekonomickej tak po kvalitatívnej stránke je výhodnejšie pre rezanie medených plechov hrúbky 1 mm voliť ako pracovný plyn kyslík.

- **Meď hrúbky 2 mm – oxidačné rezanie**

Pri vzorkoch medi hrúbky 2 mm bol z hľadiska najlepšej kvality rezných hrán vybraný vzorok č.11, ktorý pri reznej rýchlosti 9800 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 10,16 \pm 2,89\ \mu m$. Tento vzorok sa ukázal ako najlepšia voľba aj z ekonomického hľadiska, keďže rýchlosť 9800 m/min je najvyššia spomedzi volených rezných rýchlostí.. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,0043 Kč. Ako je patrné z grafu v predchádzajúcej kapitole, vzorok sa nachádza na rozhraní tried presnosti 1 a 2.

- **Meď hrúbky 2 mm – pracovný plyn stlačený vzduch**

Pri vzorkoch medi hrúbky 2 mm pri rezaní za pomoci stlačeného vzduchu boli zhotovené len dva vzorky pre porovnanie so vzorkami zhotovenými oxidačným rezaním. Z hľadiska najlepšej kvality rezných hrán a rovnako aj najvyššej reznej rýchlosti bol vybraný vzorok č.2, ktorý pri reznej rýchlosti 9200 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 14,99 \pm 2,5\mu m$. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,0045 Kč. V porovnaní so vzorkom získaným oxidačným rezaním je patrné, že vzorok pri nižšej reznej rýchlosti dosiahol vyšších hodnôt drsností a mierne vyšších nákladov na meter rezu. Z toho vyplýva, že ako po ekonomickej tak po kvalitatívnej stránke je výhodnejšie pre rezanie medených plechov hrúbky 1 mm voliť ako pracovný plyn kyslík.

- **Hliník hrúbky 2 mm**

Pri vzorkoch hliníku hrúbky 2 mm bol z hľadiska najlepšej kvality rezných hrán vybraný vzorok č.6, ktorý pri reznej rýchlosti 8500 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 8,79 \pm 1,31\ \mu m$. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,0049 Kč. Z ekonomického hľadiska sa však ukázal najlepší vzorok č.15, ktorý pri reznej rýchlosti 9000 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 9,98 \pm 1,65\ \mu m$. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,0046 Kč. Ako je patrné z grafu v predchádzajúcej kapitole, oba vzorky sa radia do triedy presnosti 1. Z toho vyplýva, že pre praktické použitie je jednoznačne výhodnejšia kombinácia rezných parametrov použitá pri vzorku č.15, keďže hodnoty drsností sa líšia minimálne.

- **Hliník hrúbky 4 mm**

Pri vzorkoch hliníku hrúbky 4 mm bol z hľadiska najlepšej kvality rezných hrán vybraný vzorok č.11, ktorý pri reznej rýchlosti 4600 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 12,74 \pm 0,38\mu m$. Tento vzorok sa ukázal ako najlepšia voľba aj z ekonomického hľadiska, keďže rýchlosť 4600 m/min je najvyššia spomedzi volených rezných rýchlostí. Náklady potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,009 Kč. Ako je patrné z grafu v predchádzajúcej kapitole, vzorok sa nachádza na rozhraní tried 1 a 2. Pre porovnanie bol vybraný vzorok s druhými najkvalitnejšími hranami, vzorok č.12, ktorý pri reznej rýchlosti 4400 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 13,87 \pm 3,76\ \mu m$. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,0094 Kč. Ako je patrné, tento vzorok pri mierne nižšej reznej rýchlosti dosiahol vyšších hodnôt drsností rezných hrán a navyše bol na rezných ranách patrný výrazný ostrý otrep. Preto je z kvalitatívneho aj ekonomického hľadiska výhodnejšie použiť kombináciu parametrov použitú pri rezaní vzorku č.11.

- **Hliník hrúbky 6 mm**

Pri vzorkoch hliníku hrúbky 6 mm bol z hľadiska najlepšej kvality rezných hrán vybraný vzorok č.9, ktorý pri reznej rýchlosti 2700 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 13,23 \pm 2,59\mu m$. Tento vzorok sa ukázal ako najlepšia voľba aj z ekonomického hľadiska, keďže rýchlosť 2700 m/min je najvyššia spomedzi volených rezných rýchlostí. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,015 Kč. Ako je patrné z grafu v predchádzajúcej kapitole, vzorok sa nachádza na rozhraní tried 1 a 2. Pre porovnanie bol vybraný vzorok s druhými najkvalitnejšími hranami, vzorok č.11, ktorý pri reznej rýchlosti 2300 m/min dosiahol hodnoty drsnosti $Rz\ 13,84 \pm 1,09\ \mu m$. Náklady na potrebné na meter rezu pri týchto rezných parametroch sú 0,018 Kč. Ako je patrné tento vzorok pri mierne nižšej reznej rýchlosti dosiahol mierne vyšších hodnôt drsností rezných hrán. Preto je z kvalitatívneho aj ekonomického hľadiska výhodnejšie použiť kombináciu parametrov použitú pri rezaní vzorku č.11.

Náklady na jeden meter rezu sú pre každú hrúbku materiálu a pre zvolenú najvhodnejšiu kombináciu parametrov zaznamenané v tab. 15.

Tab. 15 Náklady na 1 meter rezu

Materiál	Hrúbka [mm]	Kombinácia parametrov	Náklady na 1 meter rezu [Kč]
Mosadz	1	15	0,0019
Mosadz	2	16	0,006
Med' (oxidačne)	1	15	0,0017
Med' (vzduch)	1	1	0,0028
Med' (vzduch)	2	11	0,0043
Med' (oxidačne)	2	2	0,0045
Hliník	2	15	0,0046
Hliník	4	11	0,009
Hliník	6	11	0,015

10 ZÁVERY

Cieľmi tejto práce bolo osvojenie si stratégie nastavovania procesných parametrov pre dosiahnutie kvalitného rezu, osvojenie si metodiky merania drsností rezu kontaktným drsnomerom a orientácia v legislatíve kvality a vád pri tepelnom delení materiálu.

V úvodnej, rešeršnej časti práce boli popísané metódy používané pre delenie materiálu s dôrazom na laserové rezanie. V rámci technológie laserového rezania boli popísané rôzne typy laserov používaných v strojárskych praxi, rôzne metódy laserového rezania ako aj vplyv jednotlivých parametrov na rezný proces a vady, ktoré jeho dôsledkom nastávajú na výsledných rezných hranách. Rešeršná časť taktiež obsahuje popis metodiky merania drsností rezných hrán a popis normy ČSN EN ISO 9013, použitej pre vyhodnotenie vzorkov a ich zaradenie do tried presnosti.

Experimentálna časť práce bola uskutočnená v spolupráci s firmou HIWIN s.r.o., ktorá poskytla materiál a všetok strojný čas. Cieľom experimentu bolo vyhodnotiť kvalitu drsností rezných hrán vzorkov z mosadzi o hrúbkach 1 a 2 mm, bezkyslíkatej medi o hrúbkach 1 a 2 mm a zliatiny hliníku o hrúbkach 2, 4 a 6 mm. Parametre rezného procesu boli nastavované podľa Taguchiho štatistickej metódy, pre každú hrúbku a materiál bolo vykonaných 16 meraní, ktoré zaručili porovnanie najvýznamnejších kombinácií rezných parametrov.

Následné meranie drsností prebehlo na Ústave prístrojové techniky AV ČR v Brne. Spomedzi vzorkov boli následne vybrané vzorky dosahujúce najlepšie kvality rezných hrán, a vzorky dosahujúce prípustnú kvalitu rezných hrán pri čo najvyššej reznej rýchlosti. Tieto vzorky boli následne zaradené do tried drsnosti podľa normy ČSN EN ISO 9013. Následne boli jednotlivé vzorky technicko-ekonomicky porovnané s dôrazom na reznú rýchlosť a pre daný materiál a hrúbku bola vybraná ekonomicky a kvalitatívne najlepšia kombinácia rezných parametrov.

Výsledky merania drsností vybraných vzorkov ukazujú, že všetky merané hodnoty sa pohybujú v rámci 1. a 2. triedy drsnosti.

Pri rezaní zliatiny hliníka a mosadze bol použitý ako procesný plyn dusík. Pri rezaní bezkyslíkatej medi bol ako procesný plyn použitý kyslík, no pre zaujímavosť boli vykonané rezania aj za použitia stlačeného vzduchu a dusíku. Pri použití dusíku ako procesného plynu sa ukázala ako prekážka rezaniu vysoká odrazivosť materiálu, keďže povrch nebol vopred zoxidovaný kyslíkom do tej miery, aby odrazené žiarenie nebolo tak vysoké aby prinútilo automatickú ochranu laseru zariadenie vypnúť. Pri použití dusíku sa teda nepodarilo úspešne vyrezať žiadne vzorky. Pri použití stlačeného vzduchu ako procesného plynu už odrazivosť nehrala tak významnú úlohu ako pri použití dusíku a bolo zhotovených niekoľko vzorkov. Tieto vzorky však vykazovali v porovnaní so vzorkami zhotovenými oxidačným rezaním nižšiu kvalitu rezných plôch pri nižších rezných rýchlostiach. Z toho jasne vyplýva, že pri laserovom rezaní medi je kyslík ako procesný plyn výhodnejšia voľba.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV [7]

1. PILARČÍK, Edmund. *Výroba součástí do sestavy vstřikovací formy*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.
2. AICHLER, Jaroslav. *Systém managementu měření*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Vedoucí práce Ing. Petr Koška, Ph.D.
3. Aplikácie ultrazvukového zvarania a rezania. In: *S PoweR product s.r.o* [online]. Bratislava [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.spowerprod.sk/sk/produkty/ultrazvuk/aplikacie-ultrazvukoveho-zvarania-a-rezania/4>.
4. BELANČÍK, František. Ultrazvukové technológie v praxi – technológie 21. storočia!. In: *AT and P journal* [online]. Bratislava: AT and P journal, 2006 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.atpjournalsk/buxus/docs/atp-2006-05-62.pdf>
5. BELANČÍK, František. Zváranie a delenie termoplastov ultrazvukom. In: *TechPark* [online]. 2008 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/technika-92010/zvaranie-a-delenie-termoplastov-ultrazvukom.html>
6. Bezokyslíkatá meď OF-OK® pro průmyslové aplikace. In: *INKOSAS* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.inkosas.cz/templates/bezokyslikatelektrovodne-medene-plechy-pasy-pasky-folie-svitky.php>
7. *Citace pro* [online]. KMa Webdesign, 2004 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/>
8. ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
9. Detailní popis funkcí programu SprutCAM: Elektroerozivní řezání drátem (Wire EDM). In: *SoliCAD, s.r.o.* [online]. Praha [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://solicad.com/i/detailni-popis-funkci-programu-sprutcamlc/sprutcamlc-detaily/g/sprutcamlc-info?page=9>
10. *Dělení materiálu* [online]. In: . ESF [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.spsvitkovice.cz/texty/texty/STT/STT2-7_Deleni_materialu_RAJ.pdf
11. DRÁBEK, Michal. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
12. FOJTÍK, Petr. Studijní opora: Dělení technických materiálů. In: <http://www.ssampkrnov.cz/> [online]. Brno: ESF, 2011 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.ssampkrnov.cz/upload/soubory/00030.pdf>
13. Hliník a jeho slitiny. In: *ALFUN Metal Service Center* [online]. Ostrava, 2002 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/o-hliniku>
14. HORÁČEK, Lukáš. *Využití nekonvenčních paprskových technologií (LASER/vodní paprsek) ve strojírenství*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Osička..
15. KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN ISBN 80-857-7181-0.
16. KELČA, Mojmir. Vlastnosti mědi Cu-DHP. In: *Medené rozvody* [online]. Středisko mědi. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/10192698-Vlastnosti-medi-cu-dhp.html>

17. KRAJNÝ, Zdenko. Konštrukcia zariadení na obrábanie vysokotlakovým vodným lúčom - WJM. In: *TechPark*[online]. Bratislava: Strojnícka fakulta STU Bratislava, 2008 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/technika-92010/konstrukcia-zariadeni-na-obrabanie-vysokotlakovym-vodnym-lucom-wjm.html>
18. JERMOLAJEV, Štěpán. *Technologie dělení materiálu rozbrušováním*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.
19. LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. In: *Portál moderní fyziky*[online]. Olomouc, 2010 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
20. *Laserové a plazmové řezání* [online]. In: . [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
21. Laser Processing Heads BIMO. In: *HIGHYAG* [online]. Kleinmachnow [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.highyag.com/Laser-Processing-Heads/laser-processing-BIMO.html>
22. LENFELD, Petr. Technologie tváření kovů. In: *Technologie II* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec, 2008 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#018
23. LIBOR MRŇA *Konzultace*.
24. MAHR, GMBH. *MarSurf M 300 - Mahr Metrology* [online]. In: . [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.mahr.com/en/products/metrology/by-mahr-productgroup/marsurf/systems/portable-instruments/marsurf-m-300/?ContentID=10575>
25. MAŇAS, Petr. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb-YAG laserem*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
26. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser* [online]. In: . 2013 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani_laserem_2013__mrna.pdf
27. MRŇA, Libor. *Svařování svazkem elektronu* [online]. In: . 2013 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_svazkem_elektronu_2013__mrna.pdf
28. NAROVEC, David. *Analýza povrchu po řezání laserem*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
29. Nové barevné značení tlakových lahví. In: *Linde Gas s.r.o.* [online]. Praha: Linde, 2007 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.linde-gas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/BarevneZnaceniTlakLahvi200779_16200.pdf
30. NOVÁK, Miroslav. Seriál na téma lasery: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. In: *Lasery a Optika* [online]. 2011 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
31. Obrábění elektronovým paprskem. In: *ELUC* [online]. Olomouc [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1421>
32. PERŽEL, Vincent, Pavol HREHA a Milan MIČKO. Výhody a nedostatky technológií delenia kyslíkom, plazmou a laserom v praxi. In: *Strojárstvo/Strojírenství* [online]. Prešov: FVT Prešov [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/785-vyhody-a-nedostatky-technologie-delenia-kyslikom-plazmou-a-laserom-v-praxi>

33. Rezanie kyslíkom. In: *MicroStep s.r.o.* [online]. Bratislava [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.microstep.sk/produkty/technologie/rezanie_kyslikom/
34. Rezanie laserom. *LASCAM systems* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/sk/aplikacie/rezanie-laserom/>
35. Rezanie plazmou. In: *MicroStep spol. s.r.o.* [online]. Bratislava, 2010 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.microstep.sk/produkty/technologie/rezanie_plazmou/
36. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění - 6. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. ČVUT, 2008, **2008**(6), 58 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2.html>
37. Řezání autogenem. *Kovospol s.r.o.* [online]. Liberec, 2013 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://kovospol.cz/nabizime/rezani-autogenem/>
38. SEDLÁK, Ondřej. *Technologie řezání plazmovým paprskem*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
39. ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, **2008**(7), 32 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
40. ŠPAČEK, Jindřich. *Technologie II Tváření: Pomůcka ke studiu* [online]. In: . Brno, 2009 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/5TE/prednasky/5TE-spacek-prednasky-prezentace.pdf>
41. ŠTASTNÝ, Jan. *Souvislost vad řezu s řeznými parametry při laserovém řezání*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel OSIČKA, Ph.D.
42. Taguchi methods. In: *Wikipedia* [online]. 2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Taguchi_methods
43. Taguchiho metody: Řízení jakosti. In: *MultiEdu* [online]. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2012 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.highyag.com/Laser-Processing-Heads/laser-processing-BIMO.html>
44. Tepelné delenie materiálov – podstata procesu, spôsoby. In: *Strojárska technológia* [online]. 2009 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.strojarskatechnologia.info/12-tepelne-delenie-materialov-podstata-procesu-sposoby/>
45. TruMatic 3000 fiber. *TRUMPF Česká Republika* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/obrabeni-vysekavanimlaserem/vysekavacilaserove-stroje/trumatic-3000-fiber.html>
46. VACULKA, Jakub. *Měření drsnosti hran při laserovém dělení kovů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
47. VAJDOVÁ, Alena. Obrábanie vodným lúčom a jeho aplikácie. In: *Strojárstvo/Strojrenství* [online]. Žilina: ŽU v Žiline, SJF, Katedra obrábania a výrobnjej techniky [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/1296-obrabanie-vodnym-luom-a-jeho-aplikacie>
48. VRBOVÁ, Miroslava. *Lasery a moderní optika: Oborová encyklopedie*. 1. Praha: Prometheus, 1994. ISBN 80-8584956-9.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Označenie	Legenda	Jednotka
ČSN	Česká technická norma	[-]
EN	Európska norma	[-]
ISO	Internation Organisation for Standardization	[-]
LASER	Light Amplification by Stimulated Emmision of Radiation	[-]
n	Náklady na jeden meter rezu na laseri	[Kč]
Obr.	Obrázok	[-]
Ra	Priemerná aritmetická úchylka drsnosti	[μm]
Rq	Priemerná kvadratická úchylka drsnosti	[μm]
Rz	Priemerná výška prvkov profilu	[μm]
Tab.	Tabuľka	[-]
v_c	Rezná rýchlosť	[m/min]
YAG	Yttrium aluminium granát	[-]

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Ukážka laserového rezania a laserovej procesnej hlavy [21], [33].....	9
Obr. 2 Trumpf TruMatic 3000 Fiber [45]	12
Obr. 3 Princíp rezania autogénom [37]	13
Obr. 4 Konštrukcia plazmového horáka [35]	13
Obr. 5 Princíp rezania elektrónovým lúčom [31].....	14
Obr. 6 Rezanie vodným lúčom [15]	15
Obr. 7 Princíp elektroerozívneho rezania [9]	16
Obr. 8 Rôzne druhy sonotród	16
Obr. 9 Schéma rozbušky [36].....	17
Obr. 10 Trhavina SEMTEX [36].....	17
Obr. 11 Konštrukcia Slab laseru [30].....	19
Obr. 12 Aktívne prostredia pevnolátkových laserov [30]	20
Obr. 13 Konštrukcia Nd:YAG laseru [21]	20
Obr. 14 Diskový laser [30]	22
Obr. 15 Konštrukcia vláknového laseru [30]	23
Obr. 16 Poloha ohniska při tavnom laserovom rezaní [25].....	25
Obr. 17 Poloha ohniska při oxidačnom rezaní [25]	26
Obr. 18 Princíp MicroJet rezania [19].....	26
Obr. 19 Vplyv výkonu laseru na kvalitu rezu [26].....	27
Obr. 20 Závislosť reznej rýchlosti na hrúbke materiálu [25]	28
Obr. 21 Vplyv tlaku procesného plynu na vznik otrepu [26]	29
Obr. 22 Poloha ohniska při tavnom a oxidačnom rezaní [28].....	29
Obr. 23 Druhy otrepov [28].....	30
Obr. 24 Schéma sklzu [28]	31
Obr. 25 Stredná aritmetická úchylka drsnosti Ra [25]	32
Obr. 26 Priemerná výška prvkov profilu Rz [28].....	32
Obr. 27 Komparačná šablóna	33
Obr. 28 Dotykový profilometer [11]	33
Obr. 29 Parametre kolmosti rezu [8]	36
Obr. 30 Graf závislosti úchylky kolmosti na hrúbke materiálu [8].....	37
Obr. 31 Graf závislosti Rz na hrúbke materiálu[8]	37
Obr. 32 Zariadenie FLC 0800 a laser YLS 5000	38
Obr. 33 Laserová rezná hlava HIGHYAG BIMO [21].....	39
Obr. 34 Plech z hliníku Al 99,5 s nařezanými vzorkami	40
Obr. 35 Drsnomer Mahr MarSurf M3000	40
Obr. 36 Rezná hrana vzorku č.4	42
Obr. 37 Rezná hrana vzorku č.15	43
Obr. 38 Rezná hrana vzorku č.5	43
Obr. 39 Rezná hrana vzorku č.16	44
Obr. 40 Rezná hrana vzorku č.16	44
Obr. 41 Rezná hrana vzorku č.1	45
Obr. 42 Rezná hrana vzorku č.2	46
Obr. 43 Rezná hrana vzorku č.6	47
Obr. 44 Rezná hrana vzorku č.15	47
Obr. 45 Rezná hrana vzorku č.11	48
Obr. 46 Rezná hrana vzorku č.12	48
Obr. 47 Rezná hrana vzorku č.11	49
Obr. 48 Rezná hrana vzorku č.12	49

Obr. 49 Rezná hrana vzorku č.9	50
Obr. 50 Rezná hrana vzorku č.11	50
Obr. 51 Zaradenie vzorkov mosadze do tried drsnosti	51
Obr. 52 Zaradenie vzorkov hliníku do tried drsnosti	52
Obr. 53 Zaradenie vzorkov medi do tried drsnosti	53
Obr. 54 Zaradenie vzorkov medi rezanej za použitia stl.vzduchu do tried presnosti	53

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Chemické zloženie Al99,5 [13]	34
Tab. 2 Chemické zloženie CuZn37 [16]	35
Tab. 3 Parametre reznej hlavy HIGHYAG BIMO [21]	39
Tab. 4 Taguchiho ortogonálne pole pre 3 faktory v 2 úrovniach [43]	41
Tab. 5 Plné faktorové pole pre 3 faktory v 2 úrovniach [43]	41
Tab. 6 Parametre drsnomeru Mahr MarSurf M300 [24]	42
Tab. 7 Procesné parametre použité pri rezaní mosadzného plechu hrúbky 1 mm	43
Tab. 8 Procesné parametre použité pri rezaní mosadzného plechu hrúbky 2 mm	44
Tab. 9 Procesné parametre použité pri rezaní medeného plechu hrúbky 1 mm	45
Tab. 10 Procesné parametre použité pri rezaní medeného plechu hrúbky 2 mm	46
Tab. 11 Procesné parametre použité pri rezaní medených plechov hrúbky 1 a 2 mm za použitia stlačeného vzduchu jako procesného plynu	47
Tab. 12 Procesné parametre použité pri rezaní hliníkového plechu hrúbky 2 mm	48
Tab. 13 Procesné parametre použité pri rezaní hliníkového plechu hrúbky 4 mm	49
Tab. 14 Procesné parametre použité pri rezaní hliníkového plechu hrúbky 6 mm	50
Tab. 14 Náklady na 1 meter rezu	50

ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha 1 Atestácia materiálu EN AW 1050 H24
- Príloha 2 Atestácia materiálu CuZn37/EN1652 1997 1 mm
- Príloha 3 Atestácia materiálu Cu-DHP/EN1652 1997 1 mm
- Príloha 4 Atestácia materiálu CuZn37/EN1652 1997 2 mm
- Príloha 5 Atestácia materiálu Cu-DHP/EN1652 1997 2 mm

ZOZNAM VÝKRESOV

Vzorok DP-01-134109-16