



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA DRSNOST ŘEZU
PŘI LASEROVÉM DĚLENÍ KOROZIVZDORNÉ OCELI TL. 3
MM**

INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON THE ROUGHNESS OF THE CUT DURING LASER CUTTING
OF STAINLESS STEEL THICKNESS 3 MM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Novotný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jan Novotný**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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

Vliv procesních parametrů na drsnost řezu při laserovém dělení korozivzdorné oceli tl. 3 mm

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Změřit pomocí kontaktního drsnoměru drsnost ostří vzorků.

Provést vyhodnocení drsnosti a uvést do souvislosti se změnou procesních parametrů a s ohledem na normu ČSN EN ISO 9013.

Cíle bakalářské práce:

Osvojit si technologii laserového dělení materiálu pomocí pevnolátkových laserů.

Osvojit si problematiku a techniku kontaktního měření drsnosti povrchu.

Osvojit si metodiku návrhu a vyhodnocení experimentu.

Seznam doporučené literatury:

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

DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.

KANNATEY-ASIBU, E.: Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.

AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J.: Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

NOVOTNÝ Jan: Vliv procesních parametrů na drsnost řezu při laserovém dělení korozivzdorné oceli tl. 3 mm

Teoretická část podává přehled nejužívanějších typů laserů v průmyslové praxi a hlavní oblasti jejich aplikace se zaměřením na dělení materiálů. Dále pak je vysvětlena obecná problematika měření drsnosti a kvalifikace tepelných řezů.

V praktické části bylo provedeno kontaktní měření drsnosti vzorků z korozivzdorné oceli zhotovených za použití vláknového laseru a vyhodnocení vlivu tří procesních parametrů (tlaku, rychlosti a výkonu) na drsnost řezu a zařazení měřených vzorků do tříd dle normy ČSN-EN-ISO 9013.

Klíčová slova: laser, řezání, drsnost povrchu, fiber laser, hrana řezu, procesní parametry, korozivzdorná ocel.

ABSTRACT

NOVOTNÝ Jan: Influence of process parameters on the roughness of the cut during laser cutting of stainless steel thickness 3 mm

Theoretical part of the thesis provides an overview of the most often used laser devices in industry and their main domain of application, especially focused on laser cutting. It also explains measuring of surface roughness and thermal cuts qualification.

The experimental part deals with the roughness measurement of stainless steel samples cut by a fiber laser and statistical evaluation of influence of process parameters (pressure, speed and power) on the kerf roughness in regard of ČSN-EN-ISO 9013.

Keywords: laser, cutting, surface roughness, fibre laser, kerf, process parameters, stainless steel.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVOTNÝ, J. *Vliv procesních parametrů na drsnost řezu při laserovém dělení korozivzdorné oceli tl. 3 mm*. Brno, 2018. 37s, CD, Bakalářská práce Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor svařování a povrchových úprav. Vedoucí bakalářské práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce a také mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD	9
1 LASERY VYUŽÍVANÉ VE STROJÍRENSTVÍ	10
1.1 CO ₂ lasery	11
1.2 Diskové lasery.....	12
1.3 Diodové lasery	13
1.4 Vláknové lasery	13
2 VYUŽITÍ LASERŮ VE STROJÍRENSTVÍ.....	15
2.1 Svařování	15
2.2 Povrchové kalení.....	16
2.3 3D tisk.....	17
2.4 Řezání	18
2.4.1 Tavné řezání	19
2.4.2 Oxidační řezání.....	19
2.4.3 Sublimační řezání	20
2.4.4 Procesní parametry	20
2.4.5 Vady řezu.....	24
3 DRSNOST POVRCHU	25
3.1 Měření drsnosti povrchu	25
3.2 Parametry profilu drsnosti	26
3.3 Norma ISO 9013	27
4 MATERIÁL	28
5 VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA DRSNOST.....	29
5.1 Procesní parametry při experimentu	29
5.2 Měření vzorků.....	30
5.3 Drsnost řezu	31
5.3.1 Vliv tlaku pracovního plynu	31
5.3.2 Vliv výkonu	33
5.3.3 Vliv řezné rychlosti	35
6 ZÁVĚRY.....	37
Seznam literatury	
Seznam symbolů a zkratek	
Seznam obrázků	

ÚVOD [1], [2], [3], [4]

V současnosti představuje laserová technika jednu z oblastí, která zažívá velmi rychlý a progresivní vývoj. Není to však jenom oblast výroby, kde tato technologie hraje téměř nezastupitelnou roli. Naleznout ji lze prakticky ve všech ostatních oblastech lidské činnosti – např. v laserových ukazovátkách, tiskárnách, měřicí technice, medicínských přístrojích a mnoho dalších.

V průmyslu se uplatňují lasery v oblastech tepelných úprav, aditivních technologiích, svařování a také dělení materiálů, kterým se tato práce zabývá (obr. 1 a 2). Ačkoli jsou dlouhodobě využívány, jsou stále považovány za spíše nekonvenční technologii. Laser nabízí ve srovnání s dříve používanými způsoby dělení materiálu, jako je řezání kyslíkem, či plasmovým paprskem několik výhod. Je to zejména vysoká kvalita řezu, minimální tepelně ovlivněná oblast (viz obr. 3) a také umožňuje dělit většinu druhů materiálů, včetně elektricky nevodivých na rozdíl od plasmového paprsku.

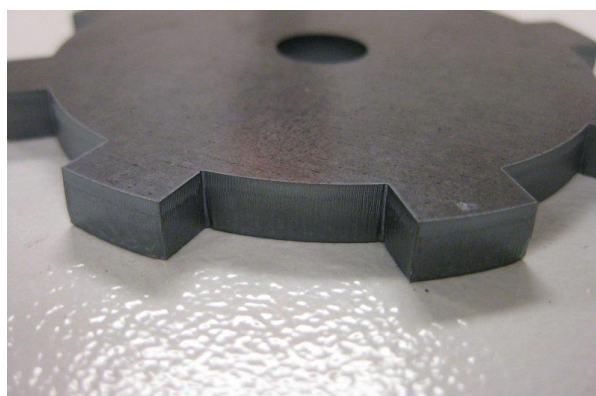
Nejpoužívanějšími typy laserů pro dělení materiálů jsou CO₂ lasery a pevnolátkové Nd:YAG lasery. Aktuálním trendem je nahrazování obou výše zmíněných typů lasery vláknovými. Toto nahrazování znamená i změnu interakce paprsku s materiálem způsobené kratší vlnovou délkou záření vláknových laserů oproti dosud používaným CO₂ zařízením. Proto je třeba prozkoumat vliv jednotlivých procesních parametrů na kvalitu řezu, čímž se zabývá praktická část této práce. Teoretická část je věnována základům laserové techniky a měření drsnosti.



Obr. 1 Dělení plošného materiálu laserem [3]



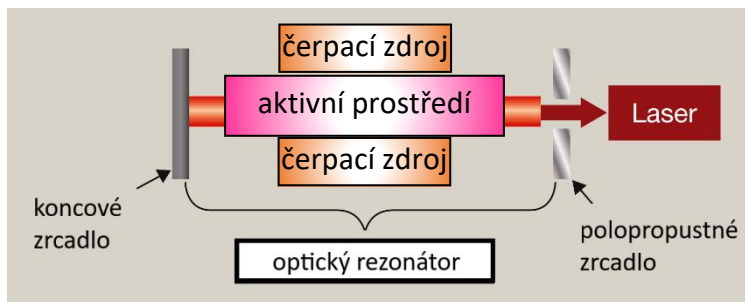
Obr. 2 Dělení prostorového tvaru laserem [4]



Obr. 3 Ukázka součásti zhotovené laserem [3]

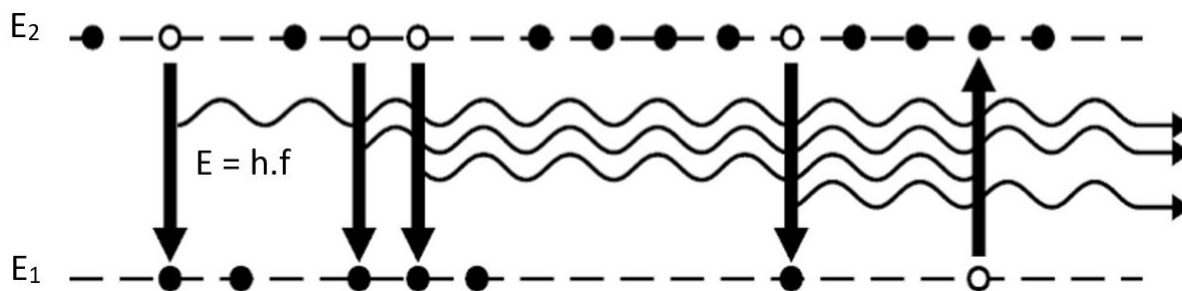
1 LASERY VYUŽÍVANÉ VE STROJÍRENSTVÍ [2], [5], [6], [7]

Ve strojírenství je využíváno několik základních typů laserů, i přes rozdílnou konstrukci je základní princip jejich fungování totožný. Elektrony v atomových obalech aktivního prostředí jsou excitovány energií dodávanou čerpacím zdrojem (např. elektrický výboj, elektromagnetické záření) (obr. 4) (hladina E_2 na obr. 5). Vnější podnět (foton) následně může iniciovat návrat vybuzeného atomu do základního stavu (E_1) za současného vyzáření fotonu s totožnými vlastnostmi a energií



Obr. 4 Princip laseru [5]

odpovídající rozdílu hladin E_1 a E_2 (viz obr. 5). Vzniklé fotony se dále odrážejí od koncových zrcadel a urychlují proces emise. Část záření uniká z rezonátoru polopropustným zrcadlem ve formě laserového paprsku.



Obr. 5 Stimulovaná emise záření [6]

Z fyzikálního principu fungování laseru plynou jedinečné vlastnosti paprsku, zejména koherence (všechny vlny mají stejnou počáteční fázi a vlnovou délku), monochromaticnost (paprsek se skládá z vlnění pouze jedné frekvence), vysoká rovnoběžnost vlnění a vysoká plošná hustota v řádu 10^9 W.cm^{-2} .

Lasery se rozlišují zejména z pohledu aktivního prostředí na pevnolátkové, kapalinové, plynové a polovodičové. Základní přehled v průmyslu využívaných laserů je uveden v tabulce č. 1, včetně některých jejich vlastností.

Tab. 1 Přehled vlastností neužívanějších laserů [8]

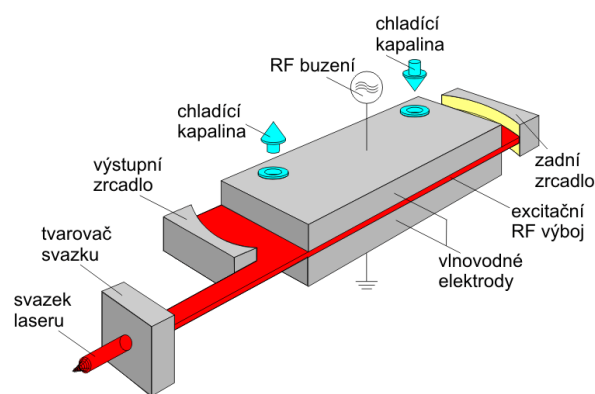
Typ	Vlnová délka [μm]	Buzení	Orientační účinnost	Výkon [kW]	Životnost [hod.]
CO2	10,6	radiofrekvenční	10 %	až 5	20 000
		elektrický výboj	25 %	až 20	neomezená
Diskový	1,03	laserové diody	15 %	až 16	10 000
Diodový	0,808 – 0,98	elektrický proud	60 %	až 10	15 000
Vláknový	1,07	laserové diody	40 %	až 80	100 000

1.1 CO₂ lasery [2], [6], [7], [8], [9], [10]

CO₂ lasery jsou používány již velmi dlouhou dobu (objev 1964) a i přes částečný ústup stále pokrývají značnou část trhu. Aktivním prostředím je směs helia, dusíku a oxidu uhličitého, kde helium tvoří zhruba 60–85 % směsi. Čerpání je zajišťováno vysokofrekvenčním, nebo doutnavým elektrickým výbojem.

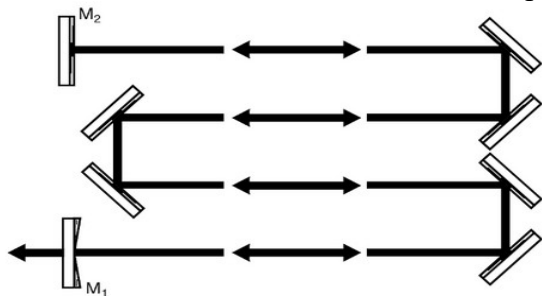
Hlavním znakem CO₂ laserů je vlnová délka 10,6 μm , která je řadí do oblasti dlouhovlnného infračerveného záření, díky tomu jsou vhodné pro dělení některých neželezných materiálů. Z této vlastnosti však plyne nemožnost vést laserový paprsek optickým vláknem. Je nutné používat čočky na bázi např. ZnSe nebo reflexní prvky s Au povrchem.

Pro nejmenší výkony, maximálně v řádech stovek wattů, jsou používány uzavřené rezonátory, kde nedochází k proudění plynu a spotřebovává se pouze v malém množství. Předností je jednoduchá konstrukce, značná odolnost a relativně vysoká životnost. Tyto lasery dosahují životnosti až tisíců hodin provozu. Problémem je však jejich komplikované chlazení. Často užívanou variantou je difúzně chlazený SLAB laser (obr. 6), kdy plyn uzavřený mezi dvě měděné desky sloužící zároveň jako budící elektrody i jako chladič zařízení. Díky jednorozměrnému teplotnímu gradientu je paprsek z difúzně chlazeného laseru velmi kvalitní. Tato varianta umožňuje dosahovat výkonů až 5 kW.



Obr. 6 SLAB laser [8]

Dalším problémem je omezené energie záření, kterou je možné vyzářit z určité délky trubice, kvůli tomu se trubice s aktivním prostředím prodlužují, což by způsobovalo neúnosné rozměry zařízení. Pro omezení velikosti se zpravidla užívá rozdělení trubice na několik částí sestavených do tvaru U, O nebo i vícekrát zalomených (viz obr. 7).



Obr. 7 Možné uspořádání rezonátoru [6]

Při vyšších výkonech dochází k zahřívání aktivního plynu a k poklesu účinnosti laseru, protože od určité teploty nejsou vhodné podmínky pro emisi fotonů, kvůli tomu plyn v trubici zařízení s vyšším výkonem proudí. Dle směru (rychlosti) se průtočné lasery dělí na typy:

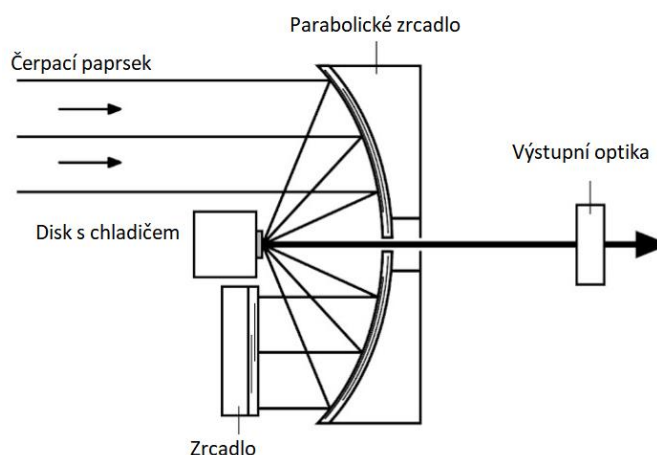
- podélné pomalé – rychlost proudění je 20 l/min, chlazené stěny rezonátoru,
- podélné rychlé – rychlost proudění plynu dosahuje hodnot až 40 m/s, teplo je odváděno vedením a plyn je ochlazován ve výměníku,
- příčným prouděním – rychlost asi 60 m/s kolmo na osu rezonátoru.

CO₂ lasery se v průmyslu používají například pro tyto účely: svařování kovových i nekovových materiálů, gravírování, dělení plastů a organických materiálů. Důležitou oblastí použití těchto laserů je dělení kovových materiálů větších tloušťek (okolo 30 mm), kde ostatní typy laserů nejsou stále ekonomicky výhodné.

1.2 Diskové lasery [2], [6], [11], [12]

Tyto lasery patří do skupiny pevnolátkových zařízení, u kterých je aktivní prostředí v tuhé fázi dopováno ionty vhodných prvků (často užíván je neodym či ytterbium). Vlnová délka všech běžně užívaných typů je okolo 1 μm , tedy v oblasti krátkovlnného infračerveného záření, díky čemuž je možné paprsek vést optickým vláknem. Materiály pro výrobu aktivního prostředí jsou například yttrito-hlinitý granát nebo sklo. Buzení je prováděno výbojkami – takzvané LPSS lasery nebo diodami (DPSS). První jmenované buzení má značně nižší účinnost, protože velká část spektra zůstává nevyužita. Vývojově staršími zástupci pevnolátkových laserů jsou tyčové, zpravidla vyráběné z Nd:YAG, u kterých je problém s chlazením aktivního prostředí. To je umístěno v nádobě s chladicí kapalinou, skrz kterou prochází čerpací zařízení.

Problém s chlazením odstraňují diskové lasery, u kterých je aktivní prostředí zhotoveno ve formě tenkého disku průměru zhruba 10 mm a tloušťky pouze několik desetin milimetru, který bývá osazen přímo na chladiči, díky čemuž je chlazení snazší. Disky jsou zpravidla zhotoveny z YAG dopovaného ionty ytterbia Yb^{3+} , emitují záření s vlnovou délkou 1,03 μm . Buzení je prováděno laserovou diodou jejíž světlo je přes parabolické zrcadlo přiváděno na disk z přední strany (viz obr. 8). Diskové lasery jsou běžně provozovány jak v kontinuálním, tak pulzním režimu.



Obr. 8 Schéma diskového laseru [6]

Možný výkon, který lze dosahovat na jednom disku je zhruba 750 W, jednotlivé moduly lze však jednoduše spojovat a docílit tak vyšších výkonů (viz obr. 9), čehož se běžně využívá

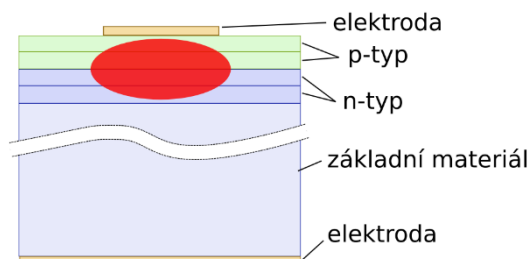


Obr. 9 Čtyři spojené moduly diskového laseru [12]

a výkon dosahuje až 16 kW. Vzhledem k účinnému chlazení a skutečnosti, že teplotní roztažnost působí takřka pouze ve směru kolmém k vyzařování, lze docílit vysoké kvality paprsku. Takové kvality paprsku nelze dosáhnout tyčovým laserem. V průmyslových aplikacích se diskové lasery nejčastěji používají jak pro svařování, tak i pro vrtání otvorů. Aktuálně jsou však z trhu vytlačovány vláknovými lasery.

1.3 Diodové lasery [6], [7], [13]

Funkce diodových, někdy takzvaných polovodičových laserů je odvozena od P-N přechodu. Mezi kovové kontakty jsou umístěny dvě polovodičové destičky – jedna typu P, druhá N složených z více vrstev (obr. 10), jako základní substrát pro jejich výrobu slouží obvykle arsenid gallitý nebo arsenid gallito-hlinitý, polovodiče jako je například křemík nelze pro výrobu laserových diod použít. Často se používá varianta, kdy mezi P a N polovodič je vložena ještě třetí vrstva, která zužuje vyzařované spektrum. Nejběžnější diodové lasery pracují s vlnovou délkou 750-870 nm (GaAs) nebo 900-1000 nm (InGaAs), tuto vlnovou délku je možné snadno řídit.



Obr. 10 Jednoduchá laserová dioda [14]

Maximální výkon dosažitelný jedním přechodem je zhruba 100 mW při kontinuálním provozu. Proto se k sobě spojuje velké množství základních jednotek do řad připevněných na chladicí desku, řady lze následně kombinovat do větších celků. Běžně dosahují výkonů až okolo 5 kW.

Výhodou polovodičových laserů je jejich vysoká účinnost, která dosahuje až 60 %, mechanická odolnost a kompaktní rozměry. Bohužel však nedosahují velkých kvalit paprsku,



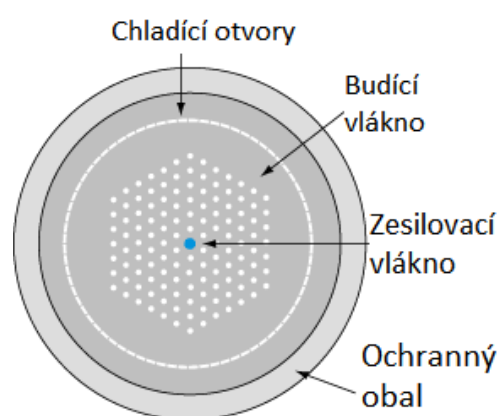
Obr. 11 Sestava diodového laseru s ostřicí optikou [6]

problematická je zejména jeho rozbíhavost. Rozbíhavost paprsku je zpravidla korigována soustavou čoček (viz obr. 11), ale ani takto nelze paprsek fokusovat do velmi malého prostoru. Kvůli tomu dosahují nižší plošné hustoty

energie, proto jsou nevhodné pro dělení materiálů. V průmyslu se uplatňují jako čerpací zdroje pro pevnolátkové lasery. Jsou také používány pro svařování plastů. Nižší hustota energie paprsku není omezující pro povrchové kalení ocelí. V poslední době se objevují i při svařování kovových materiálů, ačkoli v této oblasti zdaleka nekonkurují ostatním typům zařízení.

1.4 Vláknové lasery [6], [15], [16]

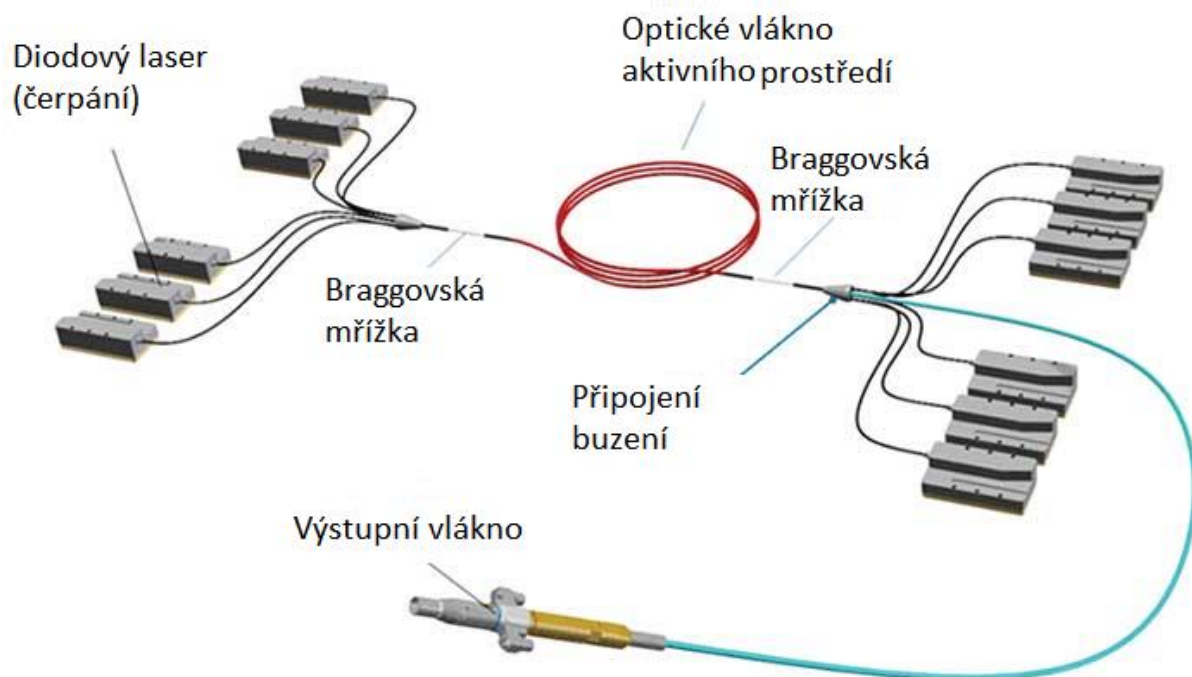
Vláknový laser je jednou z nejnovějších a zároveň stále rychle se rozvíjející laserovou technologií. Často je také označován jako fiber laser. Zesilovací vlákno je tvořeno skleněným



Obr. 12 Průřez vláknem [15]

optickým vláknem dopovaným zpravidla ytterbiem, proto pracuje na vlnové délce 1,07 μm . Vlnovou délku je možné částečně regulovat. Vláknem se skládá z několika vrstev (viz obr. 12). Průměr vlákna aktivního prostředí je několik mikrometrů, celého vlákna několik milimetrů, avšak dosahuje délky v řádech metrů, proto se obvykle stáčí do cívek. Jako koncových zrcadel aktivního prostředí je využíváno Braggových mřížek (část vlákna, kde se střídavě mění index lomu světla), která odrážejí vlnové délky laserového světla, ale umožňují průchod vlnovým délkám budícího záření. K buzení slouží svazky laserových diod připojených optickými vlákny

k aktivnímu prostředí (viz obr. 13). Čerpací diody mohou být připojeny pouze na jeden, nebo na oba konce vlákna aktivního prostředí.



Obr. 13 Schéma vláknového laseru [16]

Jedno vlákno může dosahovat výkonu zhruba 0,5 – 3 kW v závislosti na jeho konstrukci. V praxi jsou tyto vlákna spojována a běžně používaná zařízení tak dosahují výkonů až 20 kW, maximálně až 130 kW, avšak za cenu zhoršené kvality paprsku. Vláknové lasery je možno provozovat jak v kontinuálním, tak v pulzním režimu, u pulsního režimu však může hrozit poškození vlákna vlivem zpětných odrazů záření do rezonátoru při použití vysokých výkonů.

Vzhledem k velkému povrchu aktivního vlákna je možno u méně výkonných zařízení využívat chlazení pouze vzduchem. K tomu přispívá i velká účinnost celého systému, která běžně dosahuje hodnot 40 %. Díky malým nárokům na chlazení i velikost aktivního prostředí jsou zařízení vláknových laserů velmi kompaktní a mechanicky odolná. Díky vlnové délce laserového záření se pro jeho vedení dá využít optického vlákna, což značně zjednodušuje konstrukci oproti CO₂ laserům.

Výhodou je výrobci udávaná životnost okolo 100 000 hodiny provozu a fakt, že nejsou nutné žádné plyny pro chod zařízení. Díky tomu dosahují vláknové lasery nejnižší hodinové sazby ze všech používaných typů laserů.

Využívají se zejména pro řezání tenkých plechů, kde dosahují násobně vyšších rezných rychlostí oproti CO₂ laserům při zachování kvality řezu. Využívají se také pro svařování, gravírování a povrchové kalení i jiné povrchové úpravy. V průmyslu je trendem nahrazování ostatních typů laserů, zejména CO₂ laserů, lasery vláknovými ve většině aplikací.

2 VYUŽITÍ LASERŮ VE STROJÍRENSTVÍ

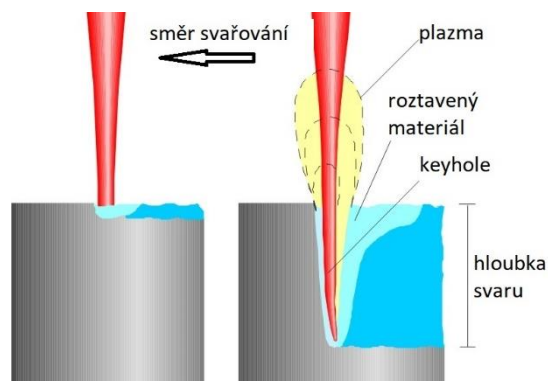
V moderním průmyslu se laserová technika používá pro celou řadu aplikací, běžně se používá laser například pro 3D skenování a měření objektů nebo existuje ruční přístroj na odstraňování koroze a nátěrů z ocelových materiálů. Nejčastěji se však lasery objevují v těchto aplikacích:

- svařování, navařování,
- povrchové zušlechťování,
- 3D tisk,
- dělení materiálů.

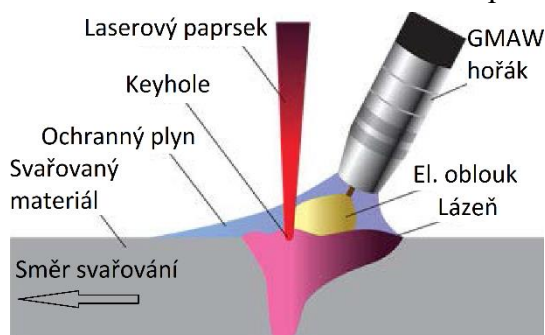
2.1 Svařování [2], [6], [7], [16], [17]

Laserové svařování se objevilo v průmyslu objevovalo v 70. letech. Oproti většině konvenčních, zejména obloukových technologiích, dosahuje řádově větší hustoty energie, srovnatelnou například se svařováním elektronovým paprskem. Z toho plyne pouze úzká tepelně ovlivněná oblast a poměrně velké hloubky závaru. Výhodou oproti zmiňovanému elektronovému paprsku je možnost svařovat za atmosférického tlaku, což značně zjednodušuje celé zařízení. Výhodou oproti obloukovým technologiím je značně vyšší rychlost svařování, možnost svařovat magnetické i nevodivé materiály a možnost snadné automatizace.

Svařování může probíhat ve dvou režimech (viz obr. 14) – kondukčním a penetračním (tzv. keyhole). V kondukčním režimu dochází k tavení materiálu pouze vedením tepla. Hloubka závaru je relativně malá, avšak je možno použít vyšších svařovacích rychlostí. U druhého jmenovaného způsobu dochází za použití vyšší plošné hustoty energie (10^8 W.cm^{-2}) k vypaření části materiálu a vytvoření tzv. keyhole, která je udržována otevřená díky tlaku par kovu. Plazma však brání průchodu laseru, proto se používá plynů jako argon, helium apod. k jejímu odstranění. Tyto plyny slouží jako ochrana před nadměrnou oxidací materiálu. Paprsek je díky mnohanásobným odrazům uvnitř otvoru dobře pohlcován materiálem. K největšímu odtavování dochází na náběžné straně paprsku, za paprskem materiál tuhne. Výhodou této metody je vysoký průvar, malá tepelně ovlivněná zóna a velká rychlost změny teplot, díky které nedochází k hrubnutí zrna materiálu. Svařování probíhá bez přídavného materiálu.



Obr. 14 Kondukční a penetrační režim [17]



Obr. 15 Laser Hybrid [18]

Existují také kombinace laserového a obloukového svařování, jako je například Laser Hybrid (obr. 15), kdy se kombinují výhodné vlastnosti obou metod. Běžně se využívá jak technologie GMAW (MIG/MAG), tak GTAW (TIG). Výhodou je až o 100 % rychlejší svařování, než při použití pouze laseru a také zvýšení absorpce záření laseru díky předeřhřátému materiálu.

Další variantou je takzvaný remote welding, kdy je svařovací hlava vzdálena od materiálu i více než 500 mm a paprsek je skrze zrcadla a čočku veden po materiálu. Výhodou je velká rychlost svařování, která není omezena rychlostí pojezdů stroje, využívá se například v automobilovém průmyslu.

2.2 Povrchové kalení [7], [19], [20]

Laserové povrchové kalení využívá vysoké energetické hustoty paprsku k velmi rychlému ohřátí kaleného materiálu nad teplotu austenitizace, k zakalení dochází v důsledku ochlazení difúzí tepla do dílce. Proces obvykle probíhá v atmosféře bez použití chladicího média, na povrchu se tak vytváří velmi tenká vrstvička oxidů v kalené oblasti. Tomuto jevu lze předcházet použitím vhodné ochranné atmosféry inertních plynů. Při kalení laserem se vytváří velký tepelný gradient, v jehož důsledku se vytváří velmi jemnozrná struktura, což je výhodou oproti klasickým metodám kalení.

Hloubka prokalené vrstvy dosahuje u běžných materiálů zhruba 1,5 mm, avšak při použití vysoce legovaných materiálů a silných zdrojů záření však může být i větší. Takto zpracované součásti si zachovávají houževnaté jádro při tvrdém a ořezuvzdorném povrchu. Vzhledem k pouze lokálním účinkům působení tepla vznikají pouze malé deformace součástí a ve velkém množství případů lze součásti používat bez dalšího opracování, což přináší značné finanční a časové úspory. Tímto způsobem se mohou zpracovávat například zuby ozubených kol (viz obr. 16).



Obr. 16 Příklad povrchového kalení zubů ozubeného kola [20]

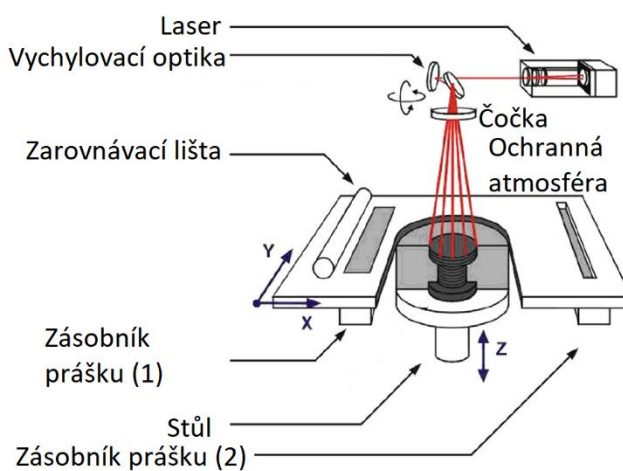
V praxi se vyskytují dvě základní varianty laserového kalení, první je použití tzv. širokého paprsku, kdy je vytvářen paprsek šířky několika desítek milimetrů a dochází tak k ohřevu celého pásu materiálu. Na překryvu jednotlivých pásů však dochází k opětovnému popuštění materiálu, které může vést ke vzniku trhlin při dynamickém namáhání. Tato metoda se používá například pro zušlechťení povrchů nástrojů pro plošné tváření. Druhou variantou je skenování, kdy je paprsek pomocí speciální optiky rozkmitán kolmo na směr zpracování. Výhodou je možnost zpracovávat jakkoli tvarované součásti, proces je však pomalejší a používá se tak na spíše menší dílce nebo pouze určité části.

Mimo kalení lze lasery využít i pro jiné tepelné zpracování povrchu materiálu, jako je například nitridace, cementace (a jejich kombinace) nebo žihání pouze určitých oblastí součástí. Možná je také homogenizace povrchu, úprava mikrostruktury, nebo legování povrchu za účelem zvýšení korozní odolnosti a ořezuvzdornosti.

2.3 3D tisk [7], [21], [22], [23], [24]

3D tisk, patřící do metod rapid prototypingu, zažívá v posledních letech nebývalý rozvoj. Jedná se aditivní způsob výroby, kdy místo tradičního způsobu zhotovování součástí odebráním materiálu (obráběním), je materiál postupně spojován vytvářející tak výsledný výrobek. Z technologií využívající laserů je nejstarší stereolitografie (SLA), která pracuje s fotopolymérem vytvrzovaným ultrafialovým zářením laseru. Objekt je utvářen v nádobě s pryskyřicí na pohyblivé platformě. Za pomoci laseru je vždy vytvrzena vrstva tloušťky 0,1 mm, poté platforma klesne a opět je vytvrzena nová vrstva. Nevytvrzená pryskyřice zároveň slouží jako opora zabraňující hroucení součástí. Další variantou je tzv. laminated object manufacturing, při které je předmět vyráběn z folie (papíru), ze kterého je za pomoci laseru vyřezán tvar vrstvy, která je přilepena na vrstvu předchozí. Následně je přetažen nový materiál a proces se opakuje. Ani jedna z technologií není v současnosti příliš uplatňována ve výrobě součástí obvykle z důvodu ne příliš výhodných mechanických vlastností.

Častěji využívanou je technologie zvaná selective laser sintering (SLS). Metoda je založena na spékání základního práškového materiálu, který zároveň slouží i jako opora. Na obrázku 17 jsou zobrazeny základní části. Z důvodu ochrany materiálu před oxidací při spékání je pracovní komora vyplněna ochranným inertním plynem. Při procesu je nejprve ze zásobníku prášku (1) zarovnávací lištou nanášena vrstva materiálu ve formě velmi jemného prášku na stůl, přebytečný materiál je umístěn do zásobníku číslo (2) odkud je znovu použit. Následně dojde pomocí laseru k natavení materiálu a jeho spečení s přechází vrstvou. Následně stůl poklesne o zvolený krok (obvykle 0,05 – 0,15 mm) a je nanášena další vrstva. Pracovní komora je vyhřívána na teplotu blízkou teplotě tavení. Typickým materiálem pro tuto technologii jsou plasty, zejména pak nylon nebo polyamid. Využít lze této technologie k výrobě keramických a skleněných součástí. Vyráběné součásti mají velmi dobré mechanické i rozměrové vlastnosti.



Obr. 17 Základní části SLS zařízení [22]

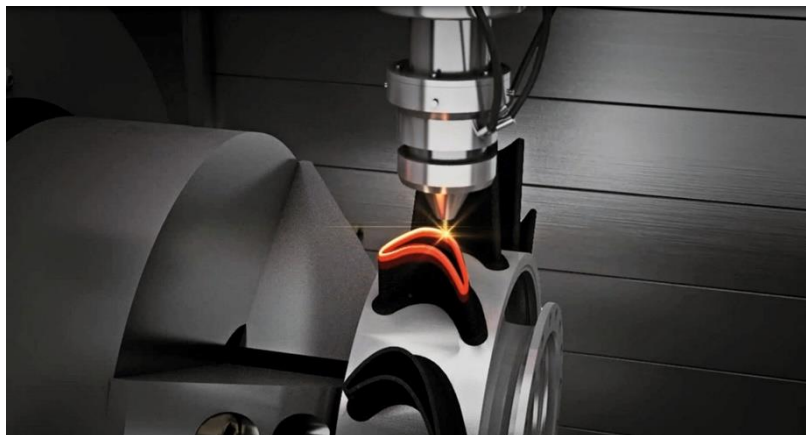
Obdobným principem pracuje technologie direct metal laser sintering (DMLS). Hlavním rozdílem je využití kovového prášku namísto plastu. Z toho plyne potřeba řádově vyšších teplot



Obr. 18 Součást vyrobená DMLS [23]

pro spékání, tedy vyšší výkon laseru. Často je využíváno vláknových laserů pro jejich vysokou účinnost a nízké nároky na chlazení. Posun stolu je obvykle zhruba 0,02 mm – lze tedy vyrábět součásti s vysokými požadavky na rozměrovou přesnost. Zpracovávanými materiály jsou typicky korozivzdorné oceli, titan, inconely nebo hliník. Vzhledem k tenké vrstvě materiálu jsou kladeny vysoké nároky na tvar a velikost jednotlivých částic prášku, z tohoto plyne jeho vysoká cena. Tato metoda je vhodná pro prototypovou výrobu součástí, často nachází uplatnění ve výrobě protéz, v kosmickém průmyslu a také při výrobě nástrojů a forem, kde lze nahradit elektroerozivní obrábění.

Nejnovější aditivní technologií, objevující se na trhu zhruba v roce 2014 je takzvaná hybridní výroba nebo také někdy hybridní obrábění. Zařízením je obráběcí centrum doplněné o speciální navařovací hlavu. Prášek kovu je tryskou nanášen na základní materiál, kde je pomocí laseru nataven a vytváří se tak požadovaný tvar (viz obr. 19), který je obvykle následně obroben.



Obr. 19 Hybridní výroba lopatek [24]

Spojují se tak oba principy výroby součástí – aditivní i substraktivní. Kombinací lze využít výhodných vlastností klasického obrábění, tedy vysokou přesnost, opakovatelnost a kvalitu povrchu s výhodami 3D tisku, hlavně úsporu materiálu a možnost vytváření jinak nevyrobitelných tvarů. Lze také kombinovat různé materiály pro různé části výrobku dle konkrétních požadavků na výsledné vlastnosti. Oproti DMLS je výhodou velké množství uloženého materiálu okolo 3,5 kg za hodinu a možnost zpracovávat velké obrobky v řádu tun. Velmi perspektivní je využití hybridní výroby v oblasti energetiky (výroba turbín) nebo například pro kusovou až malosériovou výrobu.

2.4 Řezání [2], [6], [7]

Řezání laserem je nejčastěji uplatňovanou technologií využívající energie laserového paprsku v průmyslu. Metody laserového řezání se obvykle dělí dle způsobu odstranění materiálu z místa řezu na tavné, oxidační a sublimační. Všechny metody se vyznačují vysokou kolmostí řezu, vysokou rozměrovou přesností a malou tepelně ovlivněnou zónou ve srovnání s ostatními typy tepelného dělení materiálů. Pro dělení materiálů se využívají CO₂ lasery, jsou však rychle nahrazovány vláknovými lasery. Výhodou vláknových laserů jsou nižší provozní náklady a také vyšší absorpce záření kratších vlnových délek (viz tab. 2), která v důsledku snižuje požadavky na výkon laseru. U materiálů s malou hodnotou absorpce se pro její zvýšení používá například folie nebo grafitu. Po prvotním roztavení materiálů již není rozdíl v absorpci záření různých vlnových délek výrazný a absorpce v obou případech dosahuje obvykle dostatečných hodnot pro efektivní dělení.

Tab. 2 Orientační hodnoty absorpce záření v % v závislosti na materiálu a vlnové délce [2], [6], [25]

Vlnová délka λ [μm]	10,6	1,06
Materiál	CO ₂ laser	Nd:YAG laser
Ocel – pískovaný povrch	34	68
Ocel – válcovaný povrch	12	53
Ocel – broušený povrch	7,5	30
Hliník	3	15
Titan	7,5	35
Měď	2	10

2.4.1 Tavné řezání [2], [6], [7], [26]

Řezaný materiál je laserem, pracujícím zpravidla v kontinuálním režimu ohříván nad teplotu tavení materiálu. Tavenina je následně za pomoci stlačeného plynu vyfouknuta z řezné spáry. Obvykle užívaným plynem je dusík, který je dostatečně inertní a nedochází tak k chemické reakci s řezaným materiálem a zároveň je cenově dostupný i ve velkých množstvích. Principiálně však lze využít i jiné inertní plyny, např. argon pro vysoce reaktivní materiály. Technologický plyn dosahuje zpravidla tlaku okolo 14 barů a spotřeba činí zhruba 50 Nm³/hod. Paprsek laseru je obvykle fokusován ve spodní polovině tloušťky děleného materiálu.

Technologický plyn zastává při tomto způsobu více funkcí. Kromě již zmiňovaného odstranění materiálu z řezné spáry, také chrání dělený materiál před oxidací. Důležitým parametrem je tlak plynu, který musí být dostatečný, aby odstraňovaný materiál netvořil kapky na spodní straně řezu (tuhnutím vznikají okuje), riziko okujení roste s tloušťkou materiálu kvůli většímu objemu, který je nutné odstranit.

Hlavní výhodou tavného způsobu řezání je vysoká kvalita řezu, který navíc není oxidován (viz obr. 20) a pro většinu aplikací není třeba dalších úprav povrchu řezu. Tímto způsobem lze dělit všechny kovové materiály, nejčastěji je využívám pro korozivzdorné oceli, hliník, měď a její slitiny, titan nebo plechy s povrchovou úpravou jako je pozinkování. Dále se využívá i pro plastové materiály a keramiku. Nevýhodou je značná spotřeba plynu a vyšší potřebný výkon v porovnání s oxidačním řezáním. Rychlost řezání je v tenkých



Obr. 20 Součást vyrobená tavným řezáním [26]

materiálech obdobná pro tavné i oxidační, avšak pro silnější materiály je výrazně nižší u tavného řezání, což spolu s nároky na technologický plyn prodražuje tento způsob řezání. Existují však pokusy s technologií využívající krátkovlnných fotonů (modrá oblast spektra) s vysokou energií, které jsou schopné řezat obdobnými rychlostmi jako při oxidačním řezání.

2.4.2 Oxidační řezání [2], [6], [7], [27]

Oxidační řezání je způsob laserového řezání materiálů, při kterém je namísto inertního plynu použit kyslík. Laserem roztavený materiál reaguje silně exotermickou oxidační reakcí



Obr. 21 Součást vyrobená oxidačním řezáním [27]

s kyslíkem a přispívá k tavení dosud pevné části materiálu, část materiálu odchází ve formě oxidů a pouze malá část je odstraňována jako tavenina podobně jako u řezání autogenním způsobem. Tento jev snižuje energetickou náročnost procesu, kdy samotná chemická reakce je schopna dodat až pětinasobek energie vnesené laserem. Navíc není nutné používat vysokého tlaku plynu k odstranění velkého množství taveniny. Běžně se užívá tlaků v rozmezí 1–6 bar, čímž se

sníží spotřeba pracovního plynu na množství asi 2 Nm³/hod. Dalším rozdílem oproti tavnému řezání je fokusace paprsku na vrchní plochu materiálu.

Tímto způsobem se dělí zejména konstrukční, nízko a středně legované oceli u kterých může tloušťka běžně dosahovat 30 mm při poměrně vysokých rychlostech řezání. U vysoce legovaných ocelí může docházet k silné oxidaci a běžně se nevyužívá. Nevýhodou je však horší kvalita povrchu (viz obr. 27, oxidy odstraněny) v důsledku nemožnosti řídit oblast probíhající oxidace. V řezu také vzniká silná, těžko odstranitelná vrstva oxidů, která neumožňuje takto vyrobené dílce přímo použít pro svařování a je nutné ji odstranit. Vlivem vyšších teplot také hrozí deformace výrobku, vzniká větší tepelně ovlivněná oblast a obtížná je výroba ostrých hran. I přes tyto vlastnosti je oxidační způsob řezání velmi často využíván díky nižší ceně při zachování dostatečné kvality výroby, menší spotřebě energií a vyšší rychlosti.

2.4.3 Sublimační řezání [6], [28], [29]

Při sublimačním způsobu řezání dochází k vypaření řezaného materiálu působením vysoké energie laseru. Proces vyžaduje pečlivé nastavení optické soustavy řezací hlavy vzhledem k tloušťce materiálu. Aby se zabránilo oxidaci až hoření materiálu, je používáno obdobných procesních plynů jako u tavného způsobu, pouze za menšího tlaku, tento však ochlazuje materiál a zvyšuje tak potřebný výkon. Ze své podstaty, kdy musí dojít k vypaření materiálu, vyžaduje sublimační řezání mnohem větší výkon zařízení. Obvykle se využívá pulzní režim laseru.

Sublimační způsob dělení materiálu je zpravidla užíván pro nekovové materiály, které lze snadno odpařit, jako je dřevo, lepenka, folie nebo pěnové materiály. Lze jej také využít pro dělení kovových materiálů do tlouštěk asi 1 mm, ale vzhledem k nízké řezné rychlosti a vysokým energetickým nárokům je využití ekonomicky nevýhodné, a proto méně časté. Výhodou je však vysoká kvalita povrchu hrany řezu a možnost výroby drobných detailů, proto se někdy využívá pro výrobu stentů pro medicínské aplikace.

2.4.4 Procesní parametry [6], [30], [31], [32], [33]

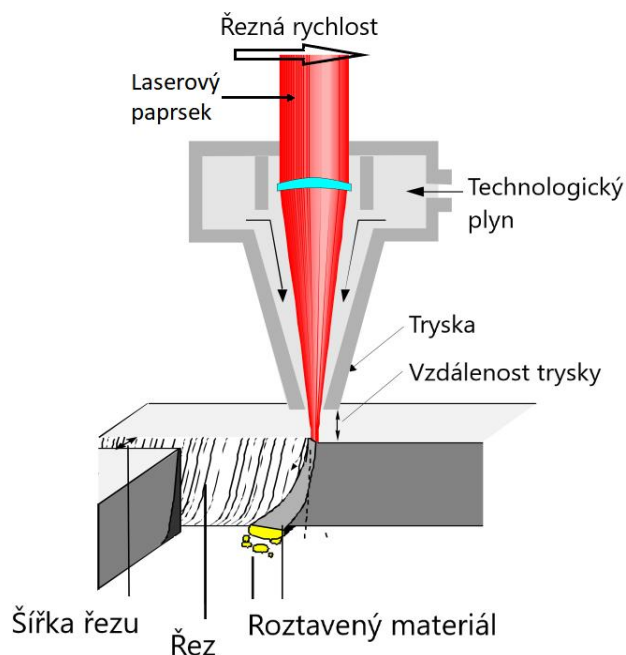
Do procesu řezání vstupuje velké množství proměnných veličin, které ovlivňují výslednou kvalitu řezu i vlastnosti materiálu v tepelně ovlivněné zóně. Principiálně se dají rozdělit na vlastnosti a charakteristiky laserového paprsku, vlastnosti materiálu a vlastní řezné parametry. Některé z těchto procesních parametrů jsou ilustrovány na obrázku číslo 22.

Vlastnosti laserového paprsku:

- vlnová délka,
- BPP (beam parameter product),
- mód paprsku.

Vlastnosti materiálu:

- chemické složení,
- jakost povrchu,
- tloušťka materiálu,
- tepelná vodivost,
- teplota tání (varu),
- absorpce záření.



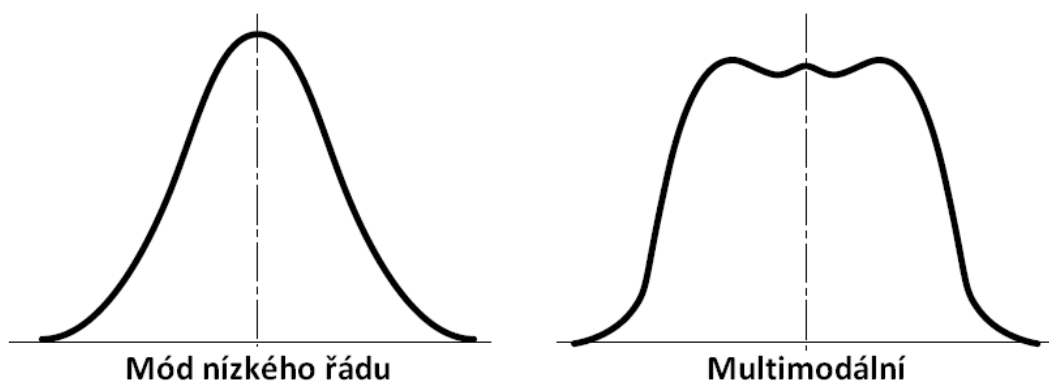
Obr. 22 Některé procesní parametry řezání [28]

Řezné parametry:

- režim řezu – pulzní/kontinuální,
- výkon laseru,
- rychlost řezání,
- typ procesního plynu,
- tlak procesního plynu,
- vzdálenost trysky od plechu a její průměr,
- poloha ohniska,
- parametry vpichu,
- parametry ostrého rohu.

Vlnová délka laserového záření je charakteristická pro určitý materiál aktivního prostředí a má zásadní vliv zejména na absorpci záření materiálem, která se obecně zvyšuje při snižování vlnové délky a také na energii fotonů, která a jejím snižováním roste. Od vlnové délky se odvíjí celková konstrukce stroje, neboť pouze kratší vlnové délky do $1,7\text{ }\mu\text{m}$ je možné vést optickým vláknem. BPP je kombinovaný paramter vyjadřující divergenci paprsku a jeho průměr, má vliv na velikost plochy na kterou působí záření a tím i na hustotu energie.

Mód paprsku vyjadřuje rozložení energie v průřezu parsku kolmo k ose šíření, je závislý na konstrukci rezonátoru a částečně i optické soustavy. Rozlišuje se tzv. mód nízkého řádu (Gaussovský), který má rozložení energie odpovídající normálnímu rozdělení. Takový paprsek je možno fokusovat do minimální velikosti bodu a dosahovat tak vyšších hustot energie. Módy vyšších řádů (multimodální) mají energii rozloženou rovnoměrněji na větší ploše a nejsou schopny fokusace do velmi malého průměru. Pouze méně výkonná zařízení (zpravidla do 5 kW) jsou schopny Gaussovského módu, při vyšších výkonech je pravidlem multimodální charakteristika. Ideální je rotační symetrie módu, která má za následek rovnoměrný ohřev materiálu. Příklady různých módů jsou na obrázku 23, kontroluje se například tzv. nastřelením do plexiskla.



Obr. 23 Schematické znázornění rozložení energie paprsku [6]

Chemické složení a z něj vyplývající chování materiálu určuje použitý způsob řezání, kdy například titan není možno řezat oxidačním způsobem, neboť proces by byl nekontrolovatelný. Jakost povrchu má zásadní vliv na odraz paprsku od materiálu a absorpci záření, proto se často upravuje například pískováním nebo nanesením grafitu pro její zvýšení. Od tloušťky materiálu se odvíjí řezná rychlost a potřebný výkon a tlak technologického plynu.

Za režim paprsku se označuje způsob dodávky energie laserovým paprskem. Při kontinuálním režimu (označován CW) jde o nepřetržitý proud fotonů. Proces je stabilnější a dosahuje vyšších řezných rychlostí. Výhodou pulzního režimu je vyšší hustota energie paprsku. Při tomto způsobu je část doby paprsek přerušen, po tuto dobu se energie akumuluje v aktivním prostředí a následně je vyzářena ve formě intenzivnějšího záření. Další výhodou

pulzního způsobu je menší tepelně ovlivněná zóna a až o 50 % větší tloušťka děleného materiálu než při využití kontinuálního režimu. Udává se tzv. duty, což je hodnota v % vyjadřující dobu záření paprsku z doby celkového provozu. Dalším parametrem je frekvence, která udává počet pulzů za jednotku času.

Od výkonu laseru se odvíjí maximální tloušťka děleného materiálu. Při příliš nízkém výkonu nedojde k protavení celé tloušťky materiálu, je zde možnost opětovného utuhnutí taveniny v řezu a povrch je velmi nekvalitní, zatímco při příliš vysokém dochází k vytváření zbytečně širokého řezu a zápalům po okraji řezu, jak je vidět na obrázku 24.



Obr. 24 Vliv výkonu na kvalitu řezu [31]

Řeznou rychlostí (rychlostí řezání) se rozumí velikost rychlosti pohybu řezné hlavy stroje vůči dělenému materiálu. Volba této hodnoty závisí na materiálu, jeho tloušťce, dostupném výkonu a také způsobu dělení. Při příliš vysoké rychlosti dochází k nedoříznutí materiálu, zatímco při příliš nízké k zápalům materiálu (viz obr. 25).



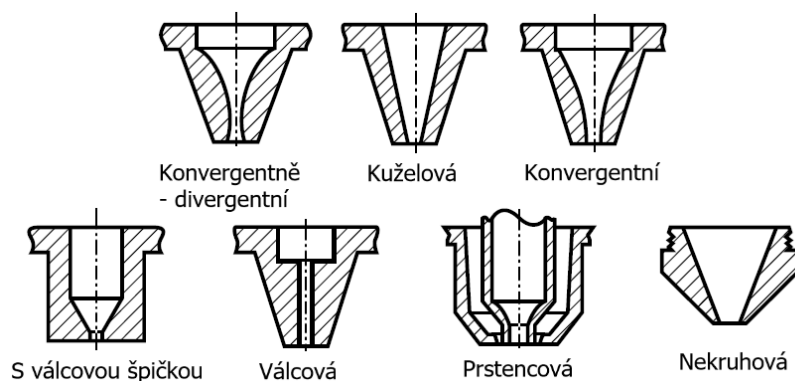
Obr. 25 Vliv řezné rychlosti na kvalitu řezu [31]

Typ technologického plynu je určen typem dělení (tavné/oxidační). Důležitým ukazatelem je jeho čistota, například u dusíku je doporučena čistota 99,999 %, při větší příměsi kyslíku dochází k nežádoucím reakcím plynu s materiálem a vznikají oxidy. Pro oxidační dělení se doporučuje čistota plynu 99,95 %. Parametrem, který lze nastavovat je tlak plynu, při příliš nízkém tlaku nedochází k dostatečnému odstranění materiálu z řezu (nízkému stupni oxidace) a utuhnutí taveniny na spodní hraně řezu (viz obr. 26), popřípadě také k nedostatečné ochraně před účinky okolní atmosféry a oxidaci povrchu. Při příliš vysokém tlaku plynu se zvyšuje jeho spotřeba (a v důsledku i náklady), dochází k turbulentnímu proudění (horší kvalita povrchu) a navíc dochází k rychlejšímu ochlazení taveniny a je třeba vyššího výkonu.



Obr. 26 Vliv tlaku plynu na kvalitu řezu [31]

S tlakem plynu souvisí volba vhodného průměru a tvaru trysky (příklady tvaru trysek jsou na obrázku 27. Obecně se pro větší tlaky volí větší průměr trysky, což však opět zvyšuje



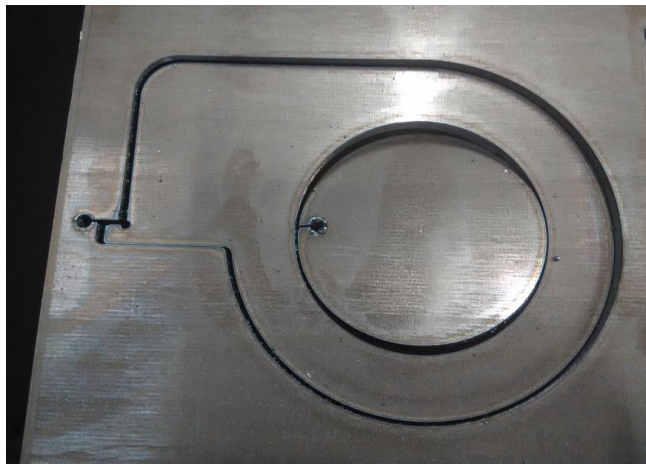
Obr. 27 Používané tvary trysek [6]

spotřebu plynu. Důležité také je, aby trysky byla čistá a symetrická, jinak dochází k nekvalitnímu dělení a vzniku vad. Nejčastěji se používá konvergentní, kuželová a prstencová špička. Dalším parametrem je vzdálenost trysky od materiálu. Volí se na základě požadovaného umístění ohniska a také dle užívaného způsobu dělení.

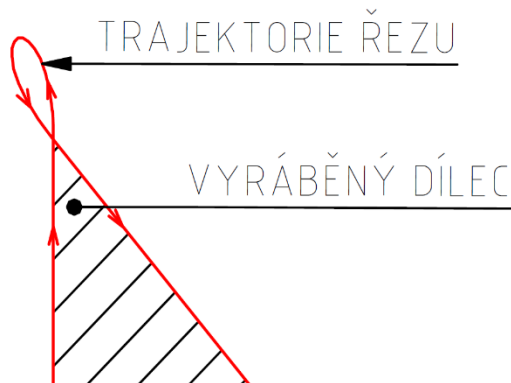
Pro oxidační způsob se udává obvykle hodnota okolo 1,5 mm (ochrana před taveninou a odletujícími produkty oxidace), pro tavný asi 0,3 mm. Problémem je udržování konstantní hodnoty na např. zvlněném materiálu (odstup je řízen aktivně pomocí elektroniky), druhou obtíží je uvolňování napětí materiálu řezem, kdy hrozí vyhnutí materiálu od roštu a následná kolize či poškození stroje.

Poloha ohniska opět závisí na zvoleném způsobu dělení. Pro oxidační způsob dělení se zpravidla volí ohnisko na horní rovině polotovaru. U tavného řezání je obvykle umístěno v polovině tloušťky materiálu a při dělení hliníku se umísťuje do spodní třetiny materiálu.

Zásadní pro výslednou jakost výrobku je umístění, popřípadě tvar vpichu. Umístěn je mimo vlastní dílec (viz obr. 28), neboť dochází k znehodnocení materiálu v jeho okolí rozstříkem. Vytvoření tohoto prvotního otvoru je zvláště u silnějších materiálu energeticky náročné, proto je při tomto procesu nulová řezná rychlost a mění se i výkon. Navíc dochází k vržení materiálu směrem k řezací hlavě, což může způsobit například poškození trysky.



Obr. 28 Příklad umístění počátečního vpichu [32]



Obr. 29 Schéma řezání ostrého rohu

Obdobně jako při počátečním vpichu je nutné korigovat výkon a rychlost i v případě ostrých rohů, v těchto místech dochází ke hromadění tepla a hrozí tak odtavení materiálu dílce. U tupých rohů (úhel $> 90^\circ$) obvykle postačuje snížit výkon tak, aby nedošlo k přehřátí místa řezu, toto je zpravidla realizováno automaticky řídicím systémem stroje. U ostrých rohů je možné modifikovat trajektorii řezu do takzvané smyčky tak, aby nedošlo k zastavení posuvu hlavy v místě rohu (viz obr. 29).

2.4.5 Vady řezu [6], [31], [33]

Vhledem ke komplexnosti procesu vznikají i při pečlivém nastavení procesních parametrů vady řezu. Tyto také často vznikají v důsledku horšího stavu stroje (vůle atd.) nebo například nevhodně upraveným povrchem děleného materiálu. Nejčastějšími vadami při dělení materiálů jsou:

- Oxidace,
- otřepy,
- asymetrie řezu,
- skluz
- pitting,
- vysoká drsnost řezu.

Oxidace vzniká v důsledku působení kyslíku na materiál. Při oxidačním dělení je bohužel nevyhnutelným jevem, při tavném způsobu je však jevem nežádoucím. Příčinou je buďto nedostatečná čistota technologického plynu (dusíku) nebo vnější vliv – např. zanesená tryska, která přivádí plyn do určitých míst v nedostatečném množství. Při tavném dělení se projevuje jako žlutohnědé oblasti na materiálu.

Otřepy vznikají na spodní hraně řezu v důsledku opětovného utuhnutí materiálu. Tato vada je častější u tavného dělení, neboť oxidy mají zpravidla nižší povrchové napětí než tavenina a vyžadují tedy menší tlak pro jejich odstranění. Při oxidačním dělení vznikají slzovité otřepy zpravidla v důsledku nevhodně zvolené rychlosti, které se obtížně odstraňují. Typickým jevem pro tavné dělení je otřep ve tvaru jehliček nebo špiček na spodní straně polotovaru, vzniká v důsledku nízkého tlaku plynu, vysoké rychlosti nebo vysoko položeného ohniska, lze však zpravidla snadno odstranit. Příklad otřepu je na obrázku 30.



Obr. 30 Příklad součásti s otřepem [34]

Asymetrii řezu se rozumí různá šířka řezné spáry na horní a spodní straně řezu nebo odchylka od kolmosti (případně požadovaného úhlu) řezu. Vzniká zpravidla v důsledku vysoké rychlosti, poškozené trysky nebo nevhodnou vzdáleností trysky od materiálu. Projevuje se častěji u silnějších materiálů.

Skluzem je myšlena příliš velká vzdálenost mezi počátečním a koncovým bodem skluzové rýhy (ideální je jejich kolmost k povrchu) ve směru řezné rychlosti, vzniká většinou v důsledku příliš vysoké řezné rychlosti.

Pitting jsou nahodile rozmístěné prohlubně (nerovnosti) na hraně řezu nepravidelných tvarů a hloubky. U oxidačního způsobu dělení vzniká v důsledku kombinace nízké řezné rychlosti, vysokého tlaku kyslíku a nevhodně zvoleného výkonu (přehřátí materiálu).

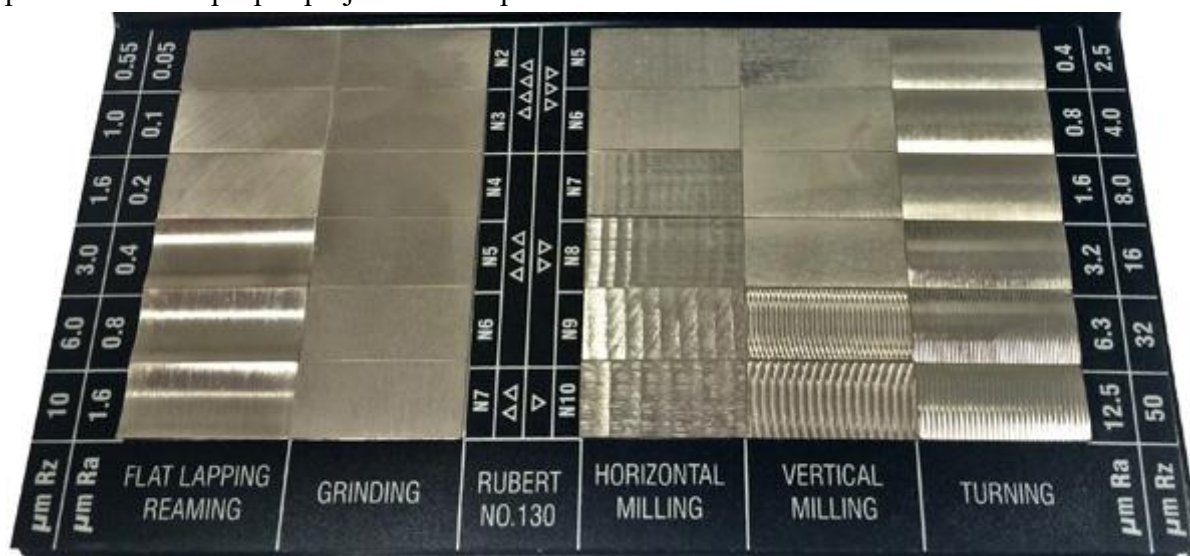
Vysoká drsnost řezu je způsobena příliš vysokým výkonem laseru (popřípadě příliš nízkou rychlostí), díky kterému dochází periodicky k nerovnoměrnému odstavování materiálu a vzniku hrubého povrchu.

3 DRSNOST POVRCHU [35]

Drsnost povrchu je složka struktury povrchu s nejmenší roztečí nerovností, nezapočítávají se do ní vady povrchu. Mezi ostatní složky základního povrchu je řazena vlnitost povrchu a základní profil. Drsnost povrchu má zásadní vliv, jak na funkční, tak senzorické vlastnosti výrobků

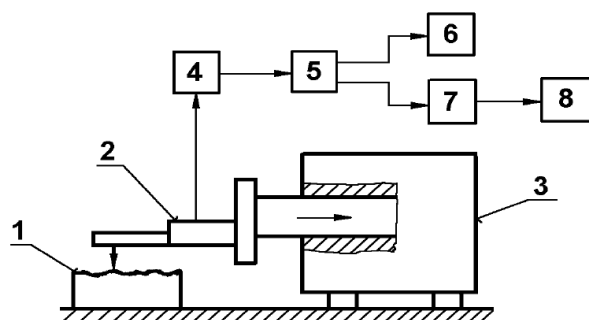
3.1 Měření drsnosti povrchu [35], [36], [37]

Drsnost povrchu lze měřit (kontrolovat) mnoha způsoby, tyto se dají rozdělit na metody kvalitativní a kvantitativní. Kvalitativní metody spočívají v porovnávání kontrolovaného povrchu s etalony známých drsností vyrobených obdobným způsobem jako daný povrch (viz obr. 31). Porovnávání může být prováděno bez použití pomůcek nebo za pomoci mikroskopů. Metoda je již zastaralá a její výstupy nelze snadno vyjádřit číselným parametrem, také je značně ovlivněna vnějšími vlivy jako jsou světelné podmínky nebo zkušenost pracovníka, proto není příliš vhodná např. pro přejímku dílů apod.



Obr. 31 Vzorkovnice povrchů [38]

Kvantitativní metody umožňují vyhodnocení povrchu přímo pomocí výpočtu určitého parametru drsnosti. Nejčastěji užívaným způsobem je měření pomocí dotykových profilometrů. Vyhodnocován je tvar průsečnice povrchu s normálovou rovinou. Schéma profilometru (někdy též nesprávně označovaného jako drsnoměr) je na obrázku 32. Měřící rameno 2 je osazeno hrotem vyrobeným z velmi tvrdého materiálu (zpravidla slinutý karbid nebo diamant), který klouže po povrchu měřené součásti (1). Hrot je tažen za pomoci posuvového zařízení (3) a je



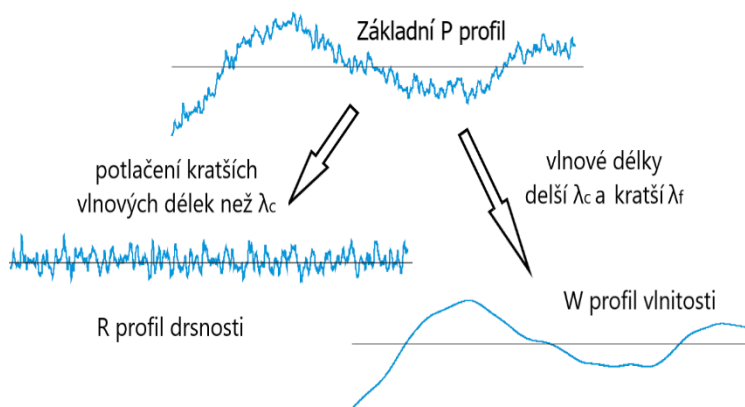
Obr. 32 Schéma profilometru [35]

snímán profil povrchu inдуктивním snímačem (4). Pomocí zesilovače a filtru (5) je signál zpracován a odeslán do registrační jednotky (6) a k matematickému zpracování (7) a následně zobrazení výsledků (8), popřípadě do počítače k dalšímu zpracování. Tyto zařízení umožňují nejenom vyhodnocení drsnosti povrchu, ale i parametrů vlnitosti. Naměřené hodnoty závisí na geometrii měřicího hrotu (úhel, radius), proto je vhodné věnovat pozornost i těmto parametrům při porovnávání výsledků.

Mimo kontaktní metody měření drsnosti jsou ve specifických případech využívány bezkontaktní metody. Pracují na různých principech, jednak se jedná o metodu využívajícího světelného řezu, druhou možností je využití interference světla po odrazu od povrchu, tyto metody jsou vhodné například pro měření obtížně dostupných míst, velmi malých součástí nebo ploch, které nesmí být žádným způsobem změněny. Dalším používaným způsobem je měření drsnosti pomocí ultrazvuku. V poslední době se také objevují přístroje pro plošné měření drsnosti, zatím však nejsou příliš časté.

3.2 Parametry profilu drsnosti [35], [36]

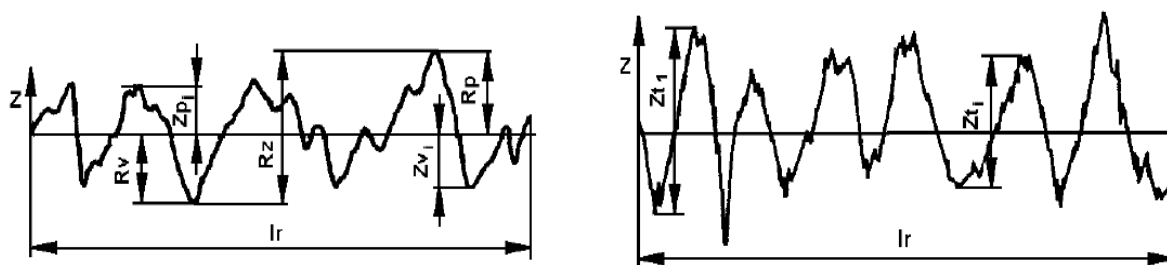
Při měření drsnosti povrchu se vychází ze skutečného tvaru součásti, který je měřen. Následně se odfiltrováním metodou nejmenších čtverců odstraní vliv tvaru dané plochy (např. naklonění), takto je získán tzv. základní profil. Tento profil je následně filtrován na základě vlnové délky λ . Pomocí horní propusti jsou odloučeny delší vlnové délky z profilu a je tak získán profil drsnosti. Odloučené vlnové délky po průchodem dolní propustí jsou zvány profilem vlnitosti (viz obr. 33). Parametry těchto profilů se označují jako:



Obr. 33 Rozdělení parametrů povrchu [36]

- P – parametry základního profilu,
- W – parametry vlnitosti,
- R – parametry drsnosti.

Z těchto profilů lze vyhodnocovat délkové, tvarové a výškové parametry, nejčastěji se vyhodnocují výškové parametry profilu drsnosti (viz obr. 34). Značný vliv na vyhodnocení parametrů drsnosti má stanovení základní délky l_r (číselně shodná s délkou λ_c) a vyhodnocovací délky l_n (obvykle volena jako pětinašobek základní délky). Tyto hodnoty jsou stanoveny normou.



Obr. 34 Výškové parametry profilu drsnosti povrchu [35]

V praxi České republiky je nejčastěji vyhodnocován parametr R_a – střední aritmetická úchylka profilu (vypočítá se jako aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic z na délce l_r). Tento parametr však není schopen postihnout extrémní výšky výstupků a prohlubní profilu.

Druhým užívaným parametrem je R_z – výška profilu drsnosti, definovaný jako součet největší výšky výstupku Z_p a největší hloubky prohlubně Z_v na jedné základní délce l_r . Tento parametr však postihuje pouze extrémní úchylky. Pro hodnocení kvality řezů je používán parametr R_{z5} – střední výška profilu, který se vypočítá jako průměr hodnot R_z z pěti základních délek l_r .

Další vyhodnocované parametry profilu drsnosti jsou:

- R_t – celková výška profilu drsnosti
- R_c – průměrná výška profilu drsnosti
- R_q – průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti
- R_{Sm} – průměrná šířka profilu drsnosti

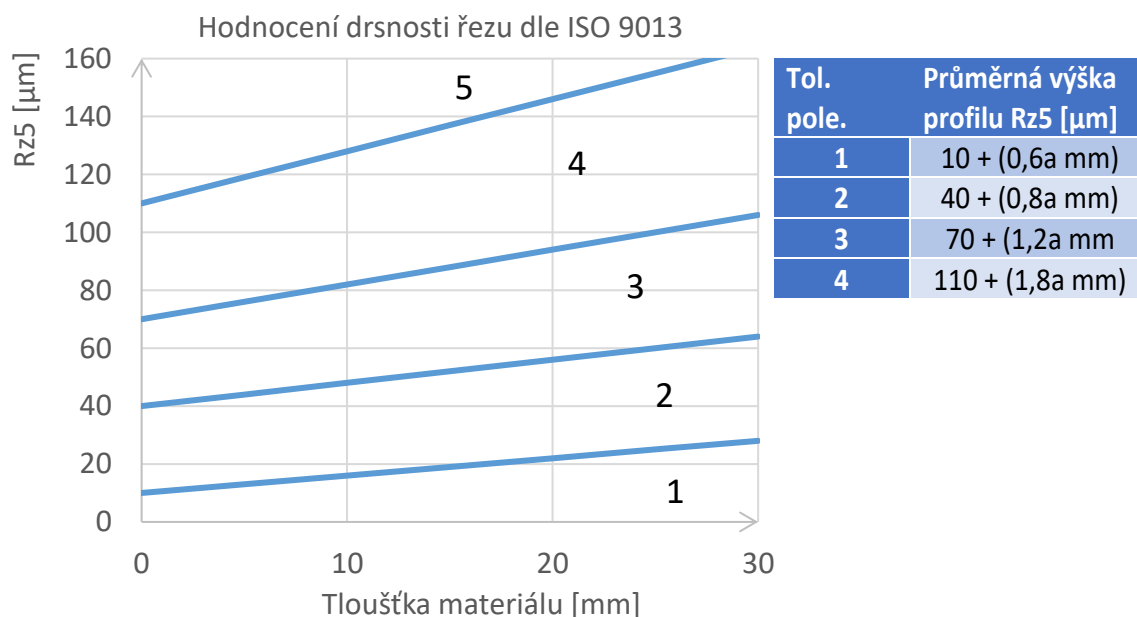
3.3 Norma ISO 9013 [39]

Tato definuje požadavky na jakost řezu při tepelných způsobech řezání – řezání kyslíkem, plazmou a laserem. Obecně ji lze uplatnit na materiály tloušťky do 300 mm pro kyslíkové řezání, 150 mm pro dělení plazmou a maximálně 40 mm při dělení laserem. Definuje geometrické tolerance řezu a také požadavky na kvalitu povrchu. Uplatňuje se jako dokument určující přejímací podmínky výrobků vyrobených uvedenými způsoby. Norma předepisuje:

- velikost skluzu,
- kolmost řezu (sklon u šikmých řezů),
- tvar horní hrany řezu,
- vady řezu (pitting, okuje),
- drsnost povrchu (střední výška profilu $Rz5$).

Pro korektní vyhodnocení drsnosti povrchu řezu, která je předmětem této práce, pak tato norma požaduje, aby povrch řezu byl okartáčován a zbaven oxidů mimo oblasti vad. Maximální přípustná chyba měření zařízení používaného pro měření hodnoty $Rz5$ činí 0,002 mm, dále popisuje zařízení jako elektronický přístroj s kontaktním hrotem schopný nepřetržitého skenování ve směru řezu. Pokud není stanoveno jinak, pak má být prováděno jedno měření na každém metru délky řezu. Pro dílce vyrobené laserovým řezáním má být měření prováděno v horní třetině tloušťky materiálu (pro materiály s tloušťkou menší 2 mm v polovině).

Měřené vzorky jsou děleny do tolerančních polí dle naměřené hodnoty parametru $Rz5$ v závislosti na jejich tloušťce. Obdobně je provedeno vyhodnocení i pro úchylky kolmosti. Na obrázku 35 jsou znázorněna toleranční pole, vpravo jsou pak uvedeny rovnice určující rozhraní jednotlivých polí. Písmenem „a“ je v tabulce označena tloušťka řezu.



Obr. 35 Toleranční pole drsnosti řezu [39]

4 MATERIÁL [40]

Vzorky pro měření byly vyrobeny z materiálu 1.4301 dle ČSN EN 10088-1, označovaného též jako X5CrNi18-10, AISI 304, popřípadě ČSN 17 240. Jedná se o austenitickou korozivzdornou ocel běžně užívanou v chemickém, farmaceutickém a potravinářském průmyslu, kde je hojně používána i díky výborné leštitelnosti. Odolává plošné korozi za běžných podmínek i při působení slabých organických a anorganických kyselin, avšak od teploty 450 °C je náchylná k mezikrystalické korozi. Složení a mechanické vlastnosti při 20 °C jsou uvedeny v tabulce číslo 3. Ocel je svařitelná běžně užívanými metodami a je také vhodná pro tažení. Jedná se o velmi často užívaný materiál pro jeho vyhovující vlastnosti a poměrně nízkou cenu.

Tab. 3 Mechanické a chemické vlastnosti oceli X5CrNi18-10 [40]

Ocel X5CrNi18-10, tl. < 6 mm								
	E [GPa]		Rp 0,2 [MPa]		Rp1,0 [MPa]		Rm [MPa]	
min.	200		230		260		540	
max.	-		-		-		750	
	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	P [%]	S [%]	N [%]
min.	-	-	-	17	8	-	-	-
max.	0,07	2,00	1,00	19,5	10,5	0,045	0,015	0,11

5 VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA DRSNOST

Vzorky pro měření a vyhodnocení drsnosti povrchu řezu byly zhotoveny na CNC laserovém řezacím centru FeiCut FCL 3015 (viz obr. 36), jehož výrobcem je firma HIWIN. Toto zařízení využívá technologii vláknového laseru o max. výkonu 4 kW. Rozměry pracovní plochy činí 1500 x 3000 mm a dosahuje přesnosti polohování 0,04 mm.

Vlastní měření probíhalo v prostorách Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky, vedl jej doc. RNDr. Libora Mrňa, Ph.D.



Obr. 36 Řezací centrum FeiCut FCL 3015 [2]

5.1 Procesní parametry při experimentu

V experimentu je sledován vliv tlaku plynu, výkonu a rychlosti na drsnost řezu. Pro vlastní měření bylo zhotoveno celkem 30 vzorků, tedy 10 ks pro každý parametr. Při výrobě jednotlivých vzorků byl postupně měněn vždy pouze jeden parametr a zbylé byly fixovány na konstantní hodnotě zvolené dle zkušeností výrobce zařízení. Řezné parametry pro jednotlivé vzorky uvádí tabulka 4, sytější barvou je označen sledovaný parametr a jeho rozsah pro sérii vzorků, vzorky byly zhotoveny tavným způsobem řezání za použití dusíku.

Tab. 4 Procesní parametry při výrobě vzorků

Značení řezu	Tlak [bar]	Výkon [W]	Rychlost [m.min ⁻¹]	Vzdálenost ohniska [mm]	Tryska -
10–19	10–19	3000	5000	3,5	HK25
20–29	14	2600–3500	5000	3,5	HK25
30–39	14	3000	3800–6500	3,5	HK25

5.2 Měření vzorků

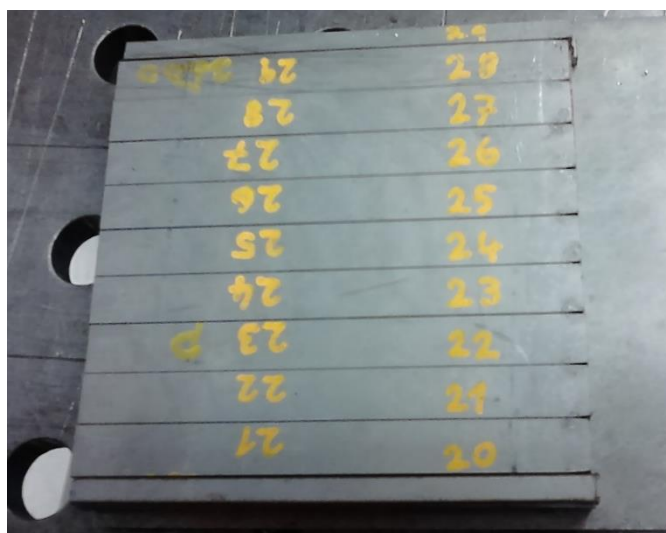
Dle požadavku normy ČSN EN ISO 9013 byl použit elektronický měřicí přístroj MarSurf M300 (inventární číslo D3-001016-0000), výrobce Mahr, s bezdrátově připojenou měřicí sondou MarSurf RD 18 od téhož výrobce, který byl poskytnut vedoucím práce. V době měření však bohužel nebyl dostupný kalibrační protokol ani kalibrovaný etalon drsnosti, který by



Obr. 37 Umístění vzorků a měřicího zařízení

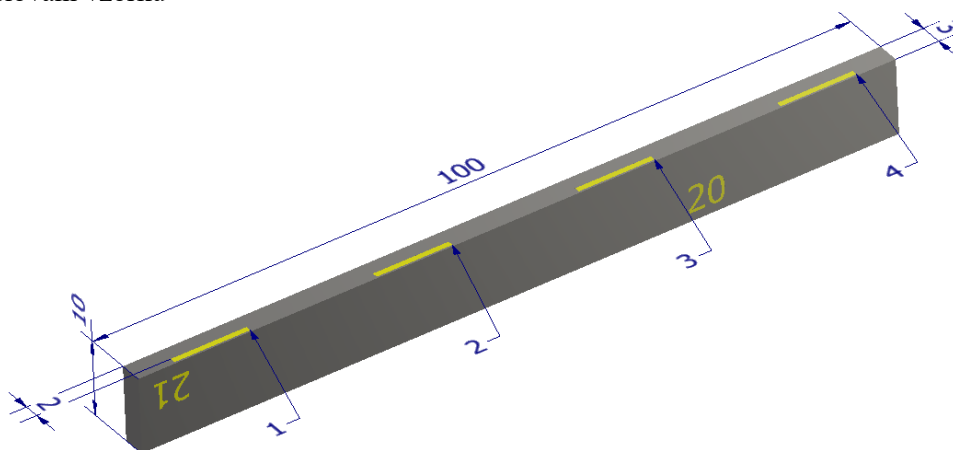
umožnil počáteční kontrolu zařízení. Profiloměr, měřicí sondu umístěnou ve stojánku a vzorek upnutý ve svěráku lze vidět na obrázku číslo 37.

Vzorky byly zhotoveny jednoduchým řezem délky zhruba 100 mm v desce materiálu o rozměrech cca 120 x 120 mm (tři desky po deseti řezech). Oddělení okrajů bylo provedeno pásovou pilou, výsledný rozměr vzorků činil 100 x 10 mm. Před rozdělením byly jednotlivé vzorky očíslovány (viz obr. 38, zobrazen stav již po oddělení okrajů pásovou pilou).



Obr. 38 Očíslování vzorků

Při měření byly vzorky upnuty do svěráku a po dohodě s vedoucím změřena jedna strana řezu. Na každém vzorku byla provedena čtyři měření jako kompromis mezi časovou náročností měření (30 vzorků) a možností budoucího statistického vyhodnocení výsledků měření. Dle zmiňované normy byl povrch řezu měřen v horní třetině od svrchní strany materiálu (označena čísla) s měřeními rozprostřenými po celé délce řezu (viz obr. 39). Naměřené hodnoty R_a a R_z byly zapisovány do tabulky MS Excel a následně vyhodnoceny.



Obr. 39 Umístění měření

5.3 Drsnost řezu

Po změření a zápisu hodnot drsnosti bylo provedeno statistické vyhodnocení parametrů R_a a R_z v prostředí MS Excel. Nejprve byl stanoven aritmetický průměr hodnot (v tabulkách níže značen $\bar{R}_a$, $\bar{R}_z$) a směrodatná odchylka (značena $s(\bar{R}_a)$, $s(\bar{R}_z)$). Z důvodu malého počtu měření byla tato hodnota opravena koeficientem k dle tabulky č. 5 (pro počet měření 4, $k = 1,7$) a získána tak nejistota měření $U(R_a)$, $U(R_z)$, nejistota měření přístroje byla zanedbána. Po proložení naměřených hodnot křivkou bylo nalezeno minimum.

Tab. 5 Hodnoty koeficientu k [35]

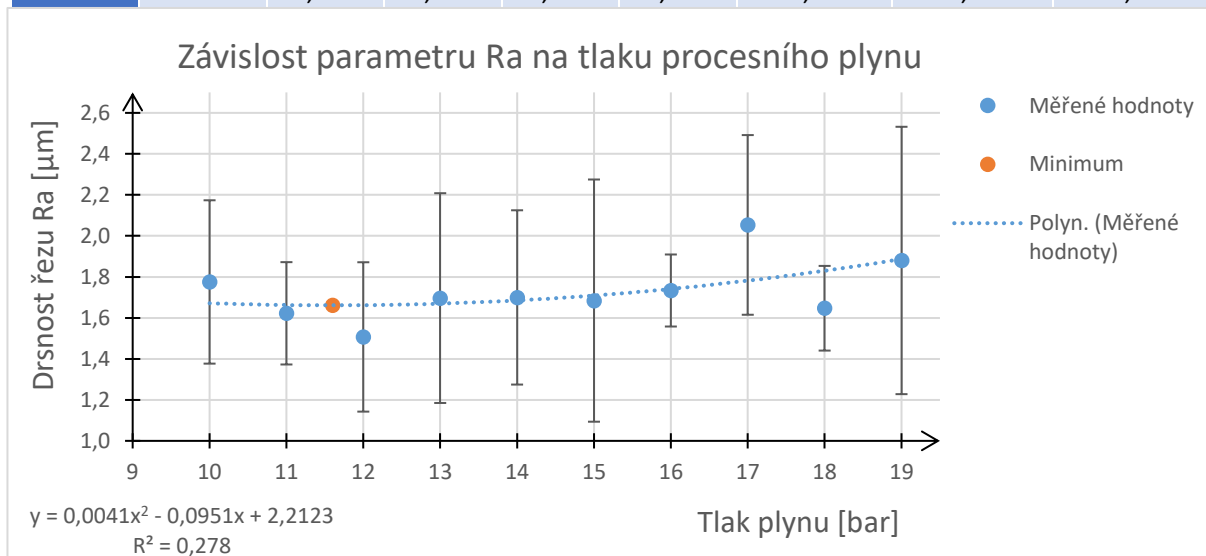
měření	2	3	4	5	6	7	8	9
k	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

5.3.1 Vliv tlaku pracovního plynu

V tabulce číslo 6 jsou zpracovány hodnoty parametru drsnosti R_a , které jsou následně zobrazeny na obrázku číslo 40. V tabulce 7 obsahuje zpracované hodnoty parametru R_z které zobrazuje obrázek 41. Minimum drsnosti povrchu řezu leží v okolí hodnoty 12 bar, konkrétně 11,6 bar pro parametr R_a a 12,5 bar pro parametr R_z . Kvalita řezu hodnocená dle ČSN EN ISO 9013 spadá při tlaku plynu do 16 bar do tolerančního pole číslo 1, tedy nejvyšší kvality. Vzorky byly pořízeny při parametrech dle tabulky číslo 4.

Tab. 6 Měřené hodnoty drsnosti R_a při změně tlaku

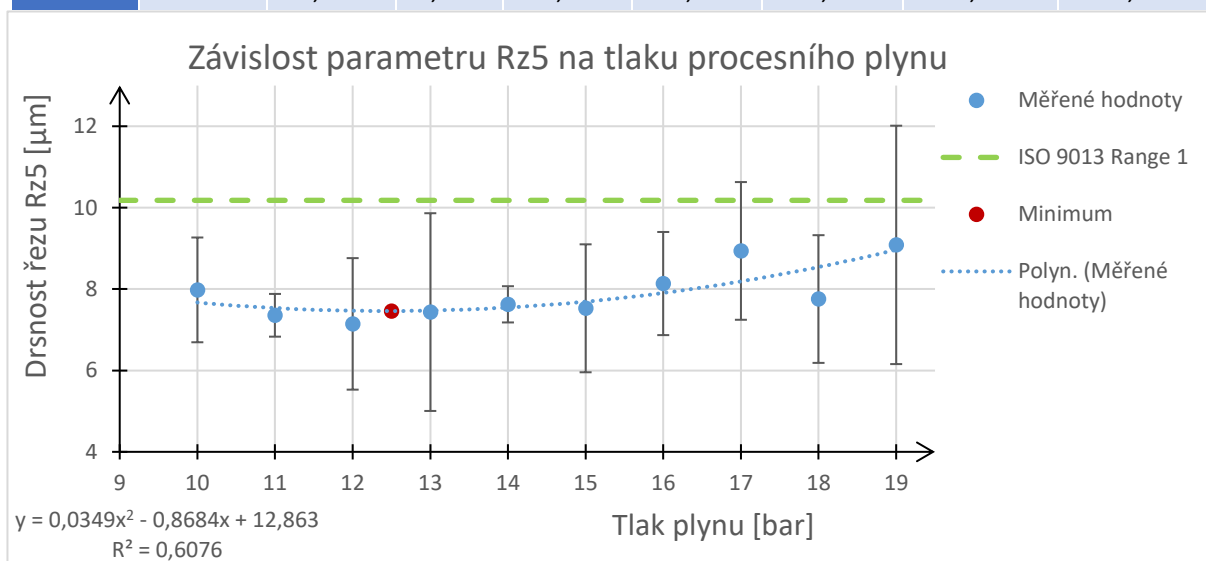
Drsnost R_a [μm]								
Značení řezu	Tlak [bar]	Měřené hodnoty				$\bar{R}_a$	$s(\bar{R}_a)$	$U(\bar{R}_a)$
		1	2	3	4			
10	10	1,962	1,601	1,546	1,992	1,78	0,23	0,40
11	11	1,586	1,614	1,468	1,821	1,62	0,15	0,25
12	12	1,572	1,659	1,607	1,190	1,51	0,21	0,36
13	13	2,063	1,690	1,326	1,707	1,70	0,30	0,51
14	14	1,698	1,387	1,715	1,999	1,70	0,25	0,43
15	15	1,188	1,704	1,890	1,955	1,68	0,35	0,59
16	16	1,735	1,866	1,614	1,719	1,73	0,10	0,18
17	17	2,407	2,030	1,987	1,790	2,05	0,26	0,44
18	18	1,516	1,609	1,656	1,807	1,65	0,12	0,21
19	19	1,453	1,965	1,740	2,362	1,88	0,38	0,65



Obr. 40 Graf závislosti drsnosti R_a na tlaku plynu

Tab. 7 Měřené hodnoty drsnosti Rz5 při změně tlaku plynu

Drsnost Rz5 [μm]								
Značení řezu	Tlak [bar]	Měřené hodnoty				$\bar{Rz5}$	$s(\bar{Rz5})$	$U(\bar{Rz5})$
		1	2	3	4			
10	10	9,005	7,954	7,190	7,770	7,98	0,76	1,29
11	11	7,143	7,050	7,532	7,697	7,36	0,31	0,53
12	12	6,856	7,476	8,244	6,001	7,14	0,95	1,62
13	13	9,317	7,550	5,902	6,967	7,43	1,43	2,43
14	14	7,968	7,331	7,589	7,611	7,62	0,26	0,45
15	15	6,266	7,409	8,285	8,148	7,53	0,92	1,57
16	16	8,714	8,699	7,139	7,990	8,14	0,75	1,27
17	17	10,100	8,440	9,363	7,846	8,94	1,00	1,69
18	18	7,195	6,748	8,559	8,517	7,75	0,92	1,57
19	19	6,671	9,025	10,395	10,250	9,09	1,72	2,93



Obr. 41 Graf závislosti drsnosti Rz5 na tlaku plynu

Na obrázku 42 jsou zachyceny povrchy jednotlivých vzorků pořízených při změně tlaku procesního plynu. Vzorek č. 19 není zachycen. Při tlacích 10–13 bar bylo pozorováno okujení spodní hrany, které mělo na vzorcích 10 a 11 formu spojitého pásu. Řez 12 vykazoval částečně souvislé okujení ve formě větších kapek. Vzorek 13 byl okujen pouze lokálně a okuje byly lehce odstranitelné prsty. Na obrázku je žlutě označeno místo s minimální drsností Rz5.



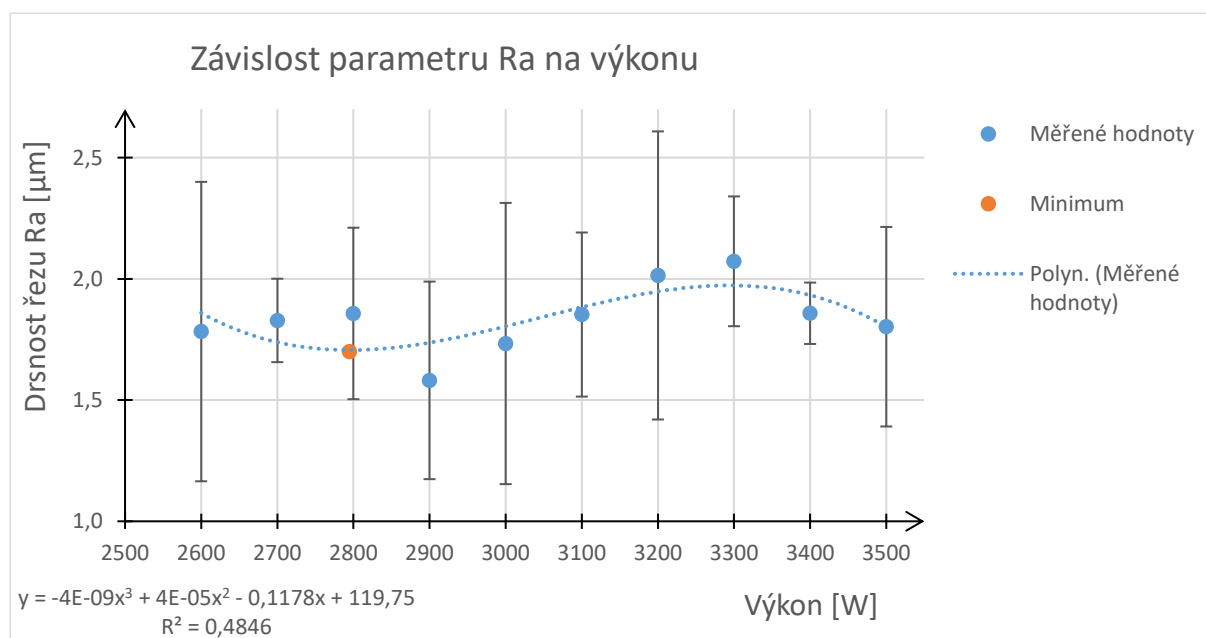
Obr. 42 Makrofoto řezů zhotovených při měněném tlaku plynu

5.3.2 Vliv výkonu

V tabulce č. 8 jsou uvedeny naměřené hodnoty drsnosti Ra, vyneseny v grafu na obr. č. 43. V tabulce 9 a obr 44 totéž pro parametr drsnosti Rz5. Graf je proložen polynomem třetího řádu, neboť při využití kvadratické paraboly nebylo možné nalézt minimum z důvodu konkávnosti funkce, proto byla zvolena kubika. Minimální hodnota výkonu pro danou rychlost řezání a tlak procesního plynu se nachází u obou parametrů drsnosti v těsném okolí hodnoty 2800 W. Všechny naměřené hodnoty spadají do 1. tolerančního pásma normy ČSN EN ISO 9013, pouze dvě hodnoty zasahují nejistotou měření výrazněji do 2. tol. pásma. Na žádném z měřených vzorků nebylo pozorováno okujení spodní strany materiálu.

Tab. 8 Naměřené hodnoty drsnosti Ra při změně výkonu

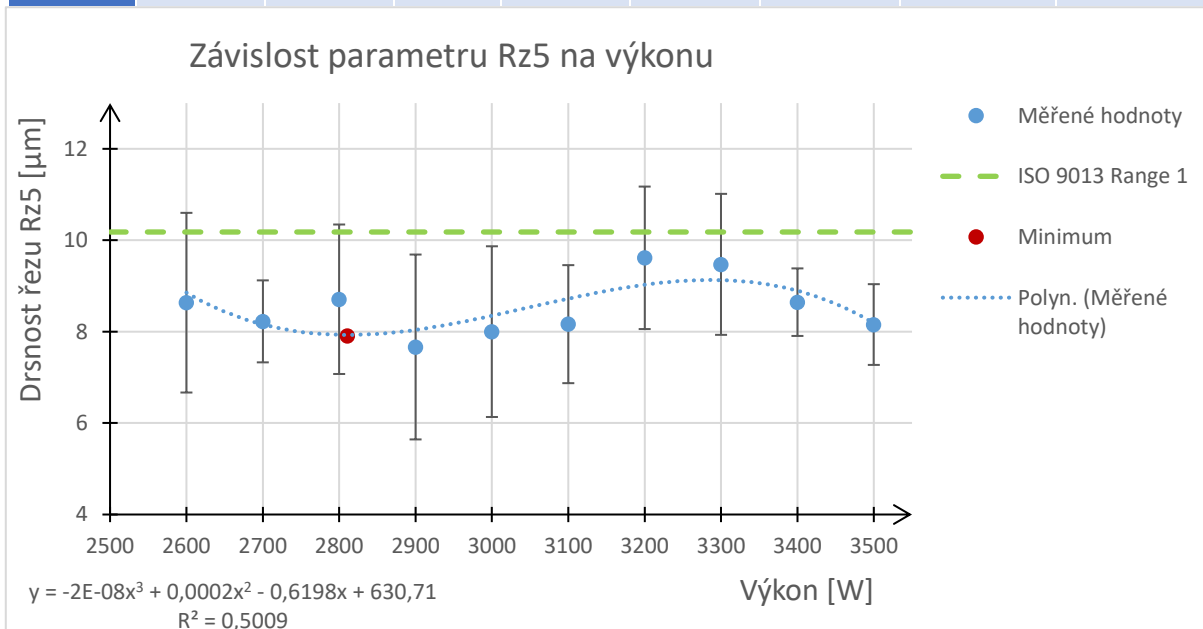
Drsnost Ra [μm]								
Značení řezu	Výkon [W]	Měřené hodnoty				$\bar{Ra}$	$s(\bar{Ra})$	$U(\bar{Ra})$
		1	2	3	4			
20	2600	1,860	1,494	1,511	2,265	1,78	0,36	0,62
21	2700	1,793	1,923	1,702	1,896	1,83	0,10	0,17
22	2800	2,016	2,016	1,819	1,578	1,86	0,21	0,35
23	2900	1,438	1,366	1,904	1,617	1,58	0,24	0,41
24	3000	1,833	1,396	2,166	1,538	1,73	0,34	0,58
25	3100	1,899	1,782	2,101	1,629	1,85	0,20	0,34
26	3200	2,351	1,633	2,267	1,805	2,01	0,35	0,59
27	3300	2,117	1,851	2,098	2,223	2,07	0,16	0,27
28	3400	1,884	1,899	1,747	1,902	1,86	0,07	0,13
29	3500	1,524	1,803	2,114	1,769	1,80	0,24	0,41



Obr. 43 Graf závislosti drsnosti Ra na výkonu laseru

Tab. 9 Naměřené hodnoty drsnosti Rz5 při změně výkonu

Drsnost Rz5 [μm]								
Značení řezu	Výkon [W]	Měřené hodnoty				$\bar{Rz5}$	$s(\bar{Rz5})$	$U(\bar{Rz5})$
		1	2	3	4			
20	2600	8,813	8,694	7,110	9,919	8,63	1,16	1,97
21	2700	8,133	8,491	7,530	8,747	8,23	0,53	0,90
22	2800	9,422	9,422	7,387	8,606	8,71	0,96	1,64
23	2900	6,790	6,566	8,250	9,054	7,67	1,19	2,02
24	3000	8,626	6,880	9,210	7,287	8,00	1,10	1,87
25	3100	7,942	7,987	9,250	7,479	8,16	0,76	1,29
26	3200	10,610	8,825	10,180	8,848	9,62	0,92	1,56
27	3300	9,433	8,521	9,237	10,700	9,47	0,91	1,54
28	3400	8,762	8,892	8,002	8,925	8,65	0,43	0,74
29	3500	7,547	8,631	8,543	7,903	8,16	0,52	0,88



Obr. 44 Graf závislosti drsnosti Rz5 na výkonu laseru

Na obrázku 45 jsou zachyceny povrchy řezů zhotovených při měněném výkonu laseru. Žlutě je označeno místo minima. Vzorek č. 20 není zachycen. Okuje viditelné v levé části obrázku jsou následky podmínek po počátečním vpichu, jinak vzorky nebyly okujeny.



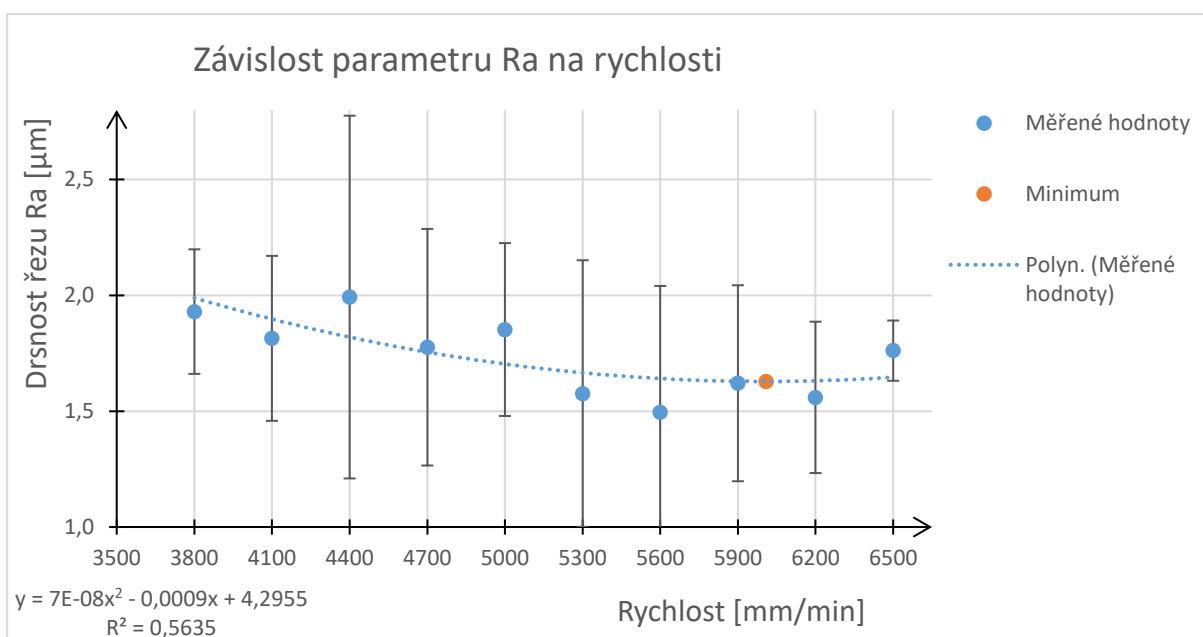
Obr. 45 Makrofoto povrchů řezů zhotovených proměnným výkonem

5.3.3 Vliv řezné rychlosti

V tabulce č. 10 jsou uvedeny naměřené hodnoty parametru Ra pro vzorky zhotovené měněnou řeznou rychlostí, zobrazeny jsou pak v grafu na obrázku 46. Měřené hodnoty parametru Rz5 a graf těchto hodnot zobrazuje tab. 11 a obr. 47. Minimum hodnot drsnosti u parametru Ra leží na hodnotě 6000 mm/min, u parametru Rz5 pak 5675 mm/sec. Hodnoty nejistoty měření pro jednotlivá měření však dosahují poměrně vysokých hodnot v oblasti nízké rychlosti. Z výsledků je patrné, že se snižující se hodnotou řezné rychlosti roste výrazně jak drsnost povrchu, tak i rozptyl těchto hodnot, což u předchozích parametrů nebylo patrné. Způsobeno je to roztavením velkého množství materiálu, což způsobuje náhodně rozmístěné oblasti s vyšší či nižší hodnotou drsnosti povrchu dle proudění plynu v daném místě. U vzorku vyrobeného rychlostí 6000 mm/min (řez č. 38) je patrné nesouvislé okujení. Při rychlosti 6200 mm/min se při daném výkonu a tlaku plynu již vytváří asi 0,5 mm vysoký souvislý pás okujení.

Tab. 10 Měřené hodnoty drsnosti Ra při změně rychlosti

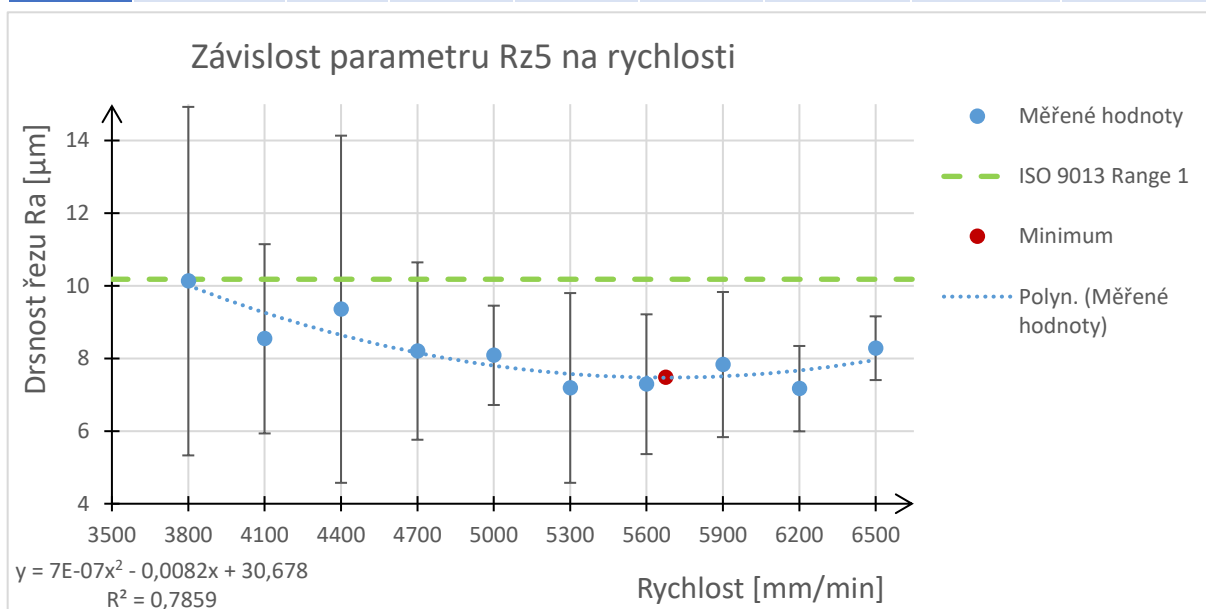
Značení řezu	Rychlost [mm/min]	Měřené hodnoty				$\bar{Ra}$	$s(\bar{Ra})$	$U(\bar{Ra})$
		1	2	3	4			
30	3800	1,802	1,864	1,893	2,160	1,93	0,16	0,27
31	4100	1,921	2,053	1,683	1,600	1,81	0,21	0,36
32	4400	1,860	1,461	2,565	2,084	1,99	0,46	0,78
33	4700	1,831	1,747	1,398	2,128	1,78	0,30	0,51
34	5000	1,568	1,822	1,928	2,091	1,85	0,22	0,37
35	5300	1,684	1,191	1,984	1,445	1,58	0,34	0,58
36	5600	1,958	1,232	1,446	1,343	1,49	0,32	0,55
37	5900	1,349	1,505	1,923	1,705	1,62	0,25	0,42
38	6200	1,372	1,714	1,736	1,416	1,56	0,19	0,33
39	6500	1,724	1,745	1,703	1,873	1,76	0,08	0,13



Obr. 46 Graf závislosti drsnosti Ra při změně řezné rychlosti

Tab. 11 Měřené hodnoty drsnosti Rz5 při změně rychlosti

Drsnost Rz5 [μm]								
Značení řezu	Rychlost [mm/min]	Měřené hodnoty				$\overline{Rz5}$	$s(\overline{Rz5})$	$U(\overline{Rz5})$
		1	2	3	4			
30	3800	7,532	8,550	10,490	13,940	10,13	2,82	4,80
31	4100	8,880	10,570	7,383	7,327	8,54	1,53	2,61
32	4400	8,118	6,738	13,270	9,292	9,35	2,81	4,78
33	4700	7,704	8,618	6,548	9,943	8,20	1,44	2,44
34	5000	7,082	8,567	7,815	8,878	8,09	0,80	1,37
35	5300	7,647	5,622	9,120	6,360	7,19	1,54	2,61
36	5600	8,523	6,232	7,973	6,432	7,29	1,13	1,92
37	5900	6,756	6,874	8,786	8,908	7,83	1,18	2,00
38	6200	6,477	7,993	7,465	6,736	7,17	0,69	1,17
39	6500	7,792	7,880	8,705	8,749	8,28	0,52	0,88



Obr. 47 Graf závislosti drsnosti Rz5 při změně řezné rychlosti

Na obrázku 48 jsou zobrazeny povrchy jednotlivých měřených povrchů řezů zhotovených při proměnné řezné rychlosti, žlutě je označena oblast minimálních hodnot drsnosti Rz5. U vzorku 39 je patrný skluz řezu a také částečná oxidace (žluté oblasti u horní hrany) způsobené příměsí v technologickém plynu.



Obr. 48 Makrofoto povrchů řezů zhotovených při měněné řezné rychlosti

6 ZÁVĚRY

V teoretické části byly popsány typy nejčastěji užívaných laserů ve strojírenství a jejich běžné aplikace. Vedoucí úlohu na trhu dnes přebírají vláknové lasery díky jejich vysoké účinnosti, snadnému vedení paprsku a kombinaci snadno dosažitelného vysokého výkonu při zachování poměrně kvalitního paprsku. Nejdůležitější výhodou je však, že dosahují násobně vyšších rychlostí v tenkých materiálech, tedy materiálech, které jsou nejčastěji řezány na laserových centrech.

Z experimentální části vyplývá, že minima drsností povrchů zhotovených variací všech tří zkoumaných parametrů patří do oblasti běžně dosažitelných hodnot na tomto zařízení a hodnoty drsnosti spadají v drtivé většině do 1. tolerančního pole normy ČSN EN ISO 9013. Nutné je však dodat, že jak přesná poloha minima kvality povrchu, tak i hodnoty drsnosti při konkrétním nastavení těchto parametrů také závisí na dalších faktorech jako je například mechanický stav stroje (vůle posuvů, momentální stav trysky), tak i na přesném chemickém složení materiálu, kde je u klíčových prvků možný až 10% rozdíl jejich obsahu.

Vyhodnocením vlivu tlaku bylo zjištěno, že nejnižší drsnost povrchu měřených vzorků nastala při hodnotě okolo 12 bar. Použitím nižšího tlaku dochází ke snížení průtoku plynu, a tedy i nákladů na jeho pořizování. I při snížení tlaku na hodnotu 10 bar nedochází k výraznému zvyšování drsnosti povrchu, který stále patří do 1. tolerančního pole normy. Dochází však k výraznému okujení spodní hrany děleného materiálu a je tedy třeba zhodnotit u každého výrobku, zdali jsou prioritou nízké náklady na výrobu a řez bude dále upravován (např. úprava viditelné hrany) nebo je třeba zajistit řez bez potřeby dodatečných úprav povrchu.

Z výsledků měření drsnosti vzorků pořízených při změně výkonu a řezné rychlosti vyplývá, že při použití výkonu laseru 3 kW by bylo možné a vhodné zvýšit řeznou rychlost na hodnotu zhruba 5600 mm/min (zvýšení o více než 10 % oproti používané hodnotě 5000 mm/min), čímž by došlo ke zvýšení produktivity práce a snížení nákladů. Ani při řezné rychlosti 6500 mm/min nedochází ke zvýšení drsnosti povrchu řezu natolik, aby takto vyrobené povrchy nespádaly do 1. tolerančního pole normy ČSN EN ISO 9013. Při použití příliš vysokého výkonu/nízké rychlosti dochází k větší variabilitě drsnosti povrchu a výskytu hlubších rýh, nicméně tato nastavení nejsou z ekonomického hlediska výhodná.

SEZNAM LITERATURY

1. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Použití laserů :: MEF. *Fyzika :: MEF* [online]. 2018 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/791-pouziti-laseru>
2. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. : il. ISBN 80-85771-81-0.
3. FEICUT. Feicut - Foto. *Feicut - Zpracování plechu (Laser Cutting)* [online]. Brno, 2018, 2018 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.feicut.cz/foto/t1123>
4. PRIMA INDUSTRIE. 3D fiber laser machine Rapido | Prima Power. In: *Prima Power | Laser and sheet metal machinery* [online]. Collegno, 2018, 2018 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.primapower.com/rapido-3d-laser-machine/>
5. HALEY, Daniel a Oliver PRATT. Basic principles of lasers. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* [online]. Elsevier, 2017, 18(12), 648-650 [cit. 2018-02-20]. DOI: 10.1016/j.mpaic.2017.10.001. ISSN 1472-0299. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1472029917302424>
6. KANNATEY-ASIBU, Elijah. *Principles of laser materials processing*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2009. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN 978-0-470-17798-3.
7. STEEN, William M. *Laser Material Processing*. 2 ed. London: Springer, 1998, 346 s. ISBN 3-540-76174-8.
8. KOŘÁN, Pavel. Základní přehled průmyslových laserů. *LAO - lasery a optika* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2014, 19.2.2013 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-12>
9. ZHANG, YONG a TIM KILLEEN. CO2 lasers--progressing from a varied past to an application-specific future. *Laser Focus World*. PennWell Corporation, 2016, 52(11), 29-32. ISSN 10438092. Dostupné také z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=119586376&lang=cs&site=ehost-live>
10. PASCHOTTA, Rüdiger. CO2 Lasers. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology* [online]. 2017 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/co2_lasers.html?s=ak
11. VAN DIJK, Martien H. H. Disc versus fiber. *Industrial Laser Solutions*. PennWell Corporation, 2005, 20(1), 18-21. ISSN 15234266. Dostupné také z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=15741157&lang=cs&site=ehost-live>
12. PASCHOTTA, Rüdiger. Thin-disk Lasers. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology* [online]. 2017 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.html
13. NASIM, Hira a Yasir JAMIL. Diode lasers: From laboratory to industry. *Optics and Laser Technology* [online]. Elsevier, 2014, 56, 211-222 [cit. 2018-02-27]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2013.08.012. ISSN 0030-3992.
14. The Proton. Facet-view diagram of simple double heterostructure laser diode. In: Wikipedia [online]. 21.2.2005 [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Simple_dh_laser_diode.svg#filelinks

15. PASCHOTTA, Rüdiger. High-power Fiber Lasers and Amplifiers. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology* [online]. 2017 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/high_power_fiber_lasers_and_amplifiers.html
16. RATH, Wolfram. Fiber Laser Welding Cuts Costs and Improves Results. *Photonics.com: Optics, Lasers, Imaging & Fiber Information Resource* [online]. Pittsfield: Laurin Publishing Co., 2018, 4.12.2017 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/a61928>
17. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Laserové svařování I (laser welding). *LAO - lasery a optika* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2014, 15.7.2011 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
18. ACHERJEE, Bappa. Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics and Laser Technology* [online]. Elsevier, 2018, 99, 60-71 [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.09.038. ISSN 0030-3992. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0030399217312410>
19. SCHUBERT, Stefan. Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 28.06.2011 [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>
20. RUETERING, Markus A. Case Study: Laser Hardening. *Thermal Processing for Gear Solutions* [online]. Pelham: Thermal Processing Magazine, 2016, 20.5.2016 [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <http://thermalprocessing.com/media/Spring-2016/0416-CaseStudy.pdf>
21. *Encyklopedie 3D tisku* [online]. [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/encyklopedie-3d-tisku>
22. SHAHZAD, Khuram, Jan DECKERS, Zhongying ZHANG, Jean-Pierre KRUTH a Jef VLEUGELS. Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. Elsevier, 2014, 34(1), 81-89 [cit. 2018-03-07]. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.023. ISSN 0955-2219. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0955221913003531>
23. Direct Metal Laser Sintering (DMLS). *TURBOCAM International* [online]. 2018 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://www.turbocam.com/direct-metal-laser-sintering-dmls>
24. Hybridní výroba spojuje 3D tisk s přesným obráběním. *Strojirenstvi.cz - Největší strojírenský portál* [online]. Brno: Nová média, 2017, 25.9.2017 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/hybridni-vyroba-spojuje-3d-tisk-s-presnym-obrabenim>
25. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIEALK. *Laserové technológie*. Bratislava: STU v Bratislave, 2000, 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
26. Tavné řezání | TRUMPF. *TRUMPF GmbH & Co. KG | TRUMPF* [online]. Praha, 2018, c2018 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/tavne-rezani/
27. Řezání plamenem | TRUMPF. *TRUMPF GmbH & Co. KG | TRUMPF* [online]. Praha, 2018, c2018 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/rezani-plamenem/
28. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting) > LAO - lasery a optika. *LAO - lasery a optika* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2014,

19.02.2013 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery-laserove-rezani-129>

29. Sublimační řezání | TRUMPF. *TRUMPF GmbH & Co. KG | TRUMPF* [online]. Praha, 2018, c2018 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/sublimacni-rezani/
30. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser: HSV - Speciální metody svařování; Řezání laserem* [online]. Brno: FSI VUT v Brně, 2013 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_rezani_laserem_2013_mrna.pdf
31. *Cutting Know-how for Amada Lasers*. Buena Park, CA: Amada America, 2011. Dostupné také z: <http://www.amada.com>
32. PODANÝ, Petr. *Porovnání drsnosti řezných hran při dělení materiálu CO2 a YbYAG laserem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.
33. *Lasers and Laser Cutting*. Ditzingen: TRUMPF GmbH + CO, 1994.
34. Advantages of Waterjet | Waterjet vs. Laser, CNC, Plasma, EDM, Stamping. *Orange County Waterjet Services | California WaterJet Cutting* [online]. 2018 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <http://www.milcowaterjet.com/advantages.php>
35. TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie – část I*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0672-X.
36. MITUTOYO. *Metrologická příručka pro přesné měřicí přístroje*. Teplice: Mitutoyo, 2013.
37. Měření drsnosti - M&B Calibr, spol. s.r.o. *M&B Calibr, spol. s.r.o.* [online]. Ivančice, 2018 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>
38. Gardco :: Roughness Comparison Specimens. *The Paul N. Gardner Company* [online]. Pompano Beach, 2018, 2018 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: https://www.gardco.com/pages/surface_pro/roughness_comparison.cfm
39. ČSN EN ISO 9013 (053401) *A Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
40. ČSN EN 10088-1 (420927) *A Korozivzdorné oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Význam
A5	[%]	Tažnost
C	-	Prvek uhlík
Cr	-	Prvek chrom
CW	-	Kontinuální režim provozu laseru
E	[GPa]	Modul pružnosti
ln	[mm]	Vyhodnocovací délka při měření drsnosti
lr	[mm]	Základní délka při měření drsnosti
Mn	-	Prvek mangan
N	-	Prvek dusík
Ni	-	Prvek nikl
P	[W]	Výkon
R	-	Parametr drsnosti povrchu
Ra	[μm]	Střední aritmetická úchylka profilu
Rm	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
Rp0,2	[MPa]	Smluvní mez kluzu při plastické deformaci 0,2 %
Rp1,0	[MPa]	Smluvní mez kluzu při plastické deformaci 1 %
Rz	[μm]	Výška profilu drsnosti
Rz5	[μm]	Střední výška profilu drsnosti
S	-	Prvek síra
Si	-	Prvek křemík
v	[mm/min]	Rychlost řezání
W	-	Parametr vlnitosti povrchu
λ	[μm]	Vlnová délka

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Přehled vlastností neužívanějších laserů.....	10
Tab. 2 Orientační hodnoty absorpce záření v % v závislosti na materiálu a vlnové délce	18
Tab. 3 Mechanické a chemické vlastnosti oceli X5CrNi18-10.....	28
Tab. 4 Procesní parametry při výrobě vzorků	29
Tab. 5 Hodnoty koeficientu k.....	31
Tab. 6 Měřené hodnoty drsnosti Ra při změně tlaku	31
Tab. 7 Měřené hodnoty drsnosti Rz5 při změně tlaku plynu	32
Tab. 8 Naměřené hodnoty drsnosti Ra při změně výkonu	33
Tab. 9 Naměřené hodnoty drsnosti Rz5 při změně výkonu	34
Tab. 10 Měřené hodnoty drsnosti Ra při změně rychlosti	35
Tab. 11 Měřené hodnoty drsnosti Rz5 při změně rychlosti	36

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Dělení plošného materiálu laserem [3]	9
Obr. 2 Dělení prostorového tvaru laserem [4].....	9
Obr. 3 Ukázka součásti zhotovené laserem [3]	9
Obr. 4 Princip laseru [5].....	10
Obr. 5 Stimulovaná emise záření [6].....	10
Obr. 6 SLAB laser [8]	11
Obr. 7 Možné uspořádání rezonátoru [6]	11
Obr. 8 Schéma diskového laseru [6]	12
Obr. 9 Čtyři spojené moduly diskového laseru [12]	12
Obr. 10 Jednoduchá laserová dioda [14].....	13
Obr. 11 Sestava diodového laseru s ostřicí optikou [6].....	13
Obr. 12 Průřez vláknem [15].....	13
Obr. 13 Schéma vláknového laseru [16]	14
Obr. 14 Kondukční a penetrační režim [17].....	15
Obr. 15 Laser Hybrid [18].....	15
Obr. 16 Příklad povrchového kalení zubů ozubeného kola [20].....	16
Obr. 17 Základní části SLS zařízení [22]	17
Obr. 18 Součást vyrobená DMLS [23].....	17
Obr. 19 Hybridní výroba lopatek [24].....	18
Obr. 20 Součást vyrobená tavným řezáním [26].....	19
Obr. 21 Součást vyrobená oxidačním řezáním [27]	19
Obr. 22 Některé procesní parametry řezání [28].....	20
Obr. 23 Schematické znázornění rozložení energie paprsku [6].....	21
Obr. 24 Vliv výkonu na kvalitu řezu [31]	22
Obr. 25 Vliv řezné rychlosti na kvalitu řezu [31]	22
Obr. 26 Vliv tlaku plynu na kvalitu řezu [31]	22
Obr. 27 Používané tvary trysek [6]	23
Obr. 28 Příklad umístění počátečního vpichu [32]	23
Obr. 29 Schéma řezání ostrého rohu	23
Obr. 30 Příklad součásti s otřepem [34].....	24
Obr. 31 Vzorkovnice povrchů [38]	25
Obr. 32 Schéma profiloměru [35]	25
Obr. 33 Rozdělení parametrů povrchu [36]	26
Obr. 34 Výškové parametry profilu drsnosti povrchu [35].....	26
Obr. 35 Toleranční pole drsnosti řezu [39]	27
Obr. 36 Řezací centrum FeiCut FCL 3015 [2].....	29
Obr. 37 Umístění vzorků a měřicího zařízení	30
Obr. 38 Očíslování vzorků	30
Obr. 39 Umístění měření	30
Obr. 40 Graf závislosti drsnosti Ra na tlaku plynu	31
Obr. 41 Graf závislosti drsnosti Rz5 na tlaku plynu	32
Obr. 42 Makrofoto řezů zhotovených při měněném tlaku plynu	32
Obr. 43 Graf závislosti drsnosti Ra na výkonu laseru.....	33
Obr. 44 Graf závislosti drsnosti Rz5 na výkonu laseru.....	34
Obr. 45 Makrofoto povrchů řezů zhotovených proměnným výkonem	34
Obr. 46 Graf závislosti drsnosti Ra při změně řezné rychlosti.....	35
Obr. 47 Graf závislosti drsnosti Rz5 při změně řezné rychlosti.....	36
Obr. 48 Makrofoto povrchů řezů zhotovených při měněné řezné rychlosti.....	36