



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MĚŘENÍ DRSNOSTI HRAN PŘI LASEROVÉM DĚLENÍ KOVŮ.

MEASUREMENT OF ROUGHNESS OF THE LASER CUTTING EDGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB VACULKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Vaculka

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Měření drsnosti hran při laserovém dělení kovů.

v anglickém jazyce:

Measurement of roughness of the laser cutting edge

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Změření drsnosti řezných hran ocelových plechů v rozsahu tloušťek 1 - 20 mm při tavném a oxidačním způsobu řezání. Srovnat s údaji v ČSN EN ISO 9013.

Cíle bakalářské práce:

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

Seznam odborné literatury:

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

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

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

V Brně, dne 23.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

VACULKA Jakub: Měření drsnosti hran při laserovém dělení kovů.

Bakalářská práce vypracovaná v rámci bakalářského studia oboru B2307 popisuje laserové řezání kovů a jeho průmyslové využití. Práce se skládá z části teoretické a experimentální.

Teoretická část popisuje fyzikální a konstrukční principy průmyslových laserů, jejich jednotlivé typy, výhody a využití.

Experimentální část zkoumá výsledky oxidačního řezání ocelí běžné jakosti. Pro experiment byl použit CO₂ laser od firmy TRUMPF. Hodnocen byl výskyt vad řezu a zejména výsledná drsnost řezné hrany. V závěru byl shrnut vliv chemického složení materiálu a parametrů řezného procesu na výsledky řezání.

Klíčová slova: laser, laserové řezání, oxidační řezání, drsnost řezné hrany

ABSTRACT

VACULKA Jakub: Measurement of roughness of the laser cutting edge.

This bachelor thesis elaborated as a part of branch 2307 engineering studies describes metal laser cutting and its industrial use. The thesis consists of theoretical part and experimental part.

The theoretical part describes physical and constructive principle of industrial lasers, its individual types, advantages and use.

The experimental part goes into results of common quality steel oxidizing cutting. The CO₂ laser from TRUMPF company was used in this experiment. Cut defect appearance and final roughness of cutting edge were the subject of evaluation. The conclusion summarizes effect of material chemical composition and cutting proces parameters on cutting results.

Keywords: laser, laser cutting, oxidizing cutting, roughness of cutting edge

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VACULKA, J. *Měření drsnosti hran při laserovém dělení kovů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 50 s. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/svarovani/publikace>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Horní Lidči dne 24.5.2012

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále také děkuji firmě VN-Ú s.r.o., Vsetín za poskytnutý materiál, výrobu vzorků a ochotnou spolupráci při předávání praktických zkušeností.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	11
1. POPIS ČINNOSTI LASERU	11
1.1. Zesílení světla	12
1.2. Buzení aktivního média	12
1.3. Optický rezonátor	13
2. LASERY POUŽÍVANÉ V PRŮMYSLU	13
2.1. Nd: YAG, vláknový a diskový laser	14
2.2. CO ₂ lasery	14
3. PŘEHLED PRŮMYSLOVÝCH LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ	15
3.1. Tepelné zpracování laserem	15
3.2. Svařování laserem	15
3.3. Řezání laserem	15
3.3.1. Interakce mezi laserovým paprskem a materiálem	16
3.3.2. Vyfukování materiálu z řezné spáry	16
3.3.3. Metody řezání	16
3.3.3.1. Tavné řezání laserem	16
3.3.3.2. Sublimační řezání	17
3.3.3.3. Oxidační řezání	17
4. SROVNÁNÍ LASERU A ALTERNATIVNÍCH TECHNOLOGIÍ	17
5. MATERIÁLY ŘEZANÉ LASEREM	18
6. PARAMETRY OVLIVNUJÍCÍ LASEROVÉ ŘEZÁNÍ	18
6.1. Parametry laserového záření	19
6.1.1. Výkon laseru	19
6.1.2. Pracovní frekvence	19
6.1.3. Mód - rozložení hustoty výkonu	19
6.1.4. Stálost výkonu	20
6.1.5. Variabilní výkon laseru	20
6.1.6. Geometrie laserového paprsku	20
6.1.7. Divergence	22
6.1.3. Polarizace	22
6.2. Parametry řezného procesu	22
6.2.1. Řezná rychlost	22
6.2.2. Odhad řezné rychlosti	23
6.2.3. Druhy plynu	24

6.2.4. Tlak plynu a geometrie trysky	24
6.3. Parametry obrobku	25
6.3.1. Tloušťka materiálu	25
6.3.2. Druh materiálu	25
6.3.3. Povrch obrobku	26
7. HODNOCENÍ KVALITY ŘEZU LASEREM	27
7.1. Vznik ottepu	27
7.2. Vlastnosti řezné spaly	28
7.3. Pitting	29
7.4. Drsnost povrchu řezu	30
7.5. Vroubkování řezné hrany	31
7.6. Kolmost a tolerance sklonu řezu	32
8. MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	33
8.1. Metody hodnocení drsnosti povrchu	33
9. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	35
9.1. Použité materiály	35
9.2. Použité stroje a přístroje	37
9.3. Pracovní postupy	39
9.4. Vyhodnocení vzorků	39
10. ZÁVĚR	48

Seznam použitých zdrojů

ÚVOD

V dnešní době jsme doslova obklopeni technologiemi, které by se jen s velkými obtížemi obešly bez Laseru. Co to vlastně je Laser? Ve všeobecném povědomí je zapsán jako tenký paprsek světla o velké intenzitě. Málokdo si ovšem plně uvědomuje obrovský potenciál tohoto technologického fenoménu a jeho samotného fyzikálního principu. Tento princip je skrytý již ve slově LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - zesílení světla pomocí stimulované emise). Základem funkce laseru jakéhokoliv druhu a využití je působení světla (fotonů) na elektrony zesilující látky, vyskytující se na specifických hladinách (Orbitalech okolo jádra atomu). Tyto elektrony lze vyrazit z jejich dráhy na vyšší energetickou hladinu pomocí vnější energie. Zesilující látka má však tendenci navracet se do „rovnovážného stavu“, tedy navracet elektrony zpět na původní energetické hladiny. Při tomto procesu je vyzařována energie ve formě světla. V tomto případě jde o tzv. spontánní emisi. Pokud dokážeme nabudit elektrony na tzv. zakázané hladiny, lze je vrátit do energeticky nižších stavů jen pomocí tzv. stimulované emise, kdy tento přechod je vynucen fotonem pohybujícím se v těsné blízkosti takto nabuzeného atomu. Vyzářený foton má pak stejné vlastnosti jako ten budící – tedy vlnovou délku, směr šíření a polarizaci. Tuto energii je poté možné koncentrovat do tenkého paprsku a využít tak jeho energii pro specifický účel jako např. dělení, svařování, tepelné zpracování, značení materiálů apod.

1. POPIS ČINNOSTI LASERU [1], [2], [3], [5], [8]

Pro konkrétní popis činnosti využijeme pro názornost rubínový laser. Ten byl vynalezen již v roce 1960. Rubín je monokrystalický oxid hliníku s hexagonální krystalickou mřížkou. Jeden z atomů hliníku je zde substitučně nahrazen atomem chrómu. Hlavním důsledkem přítomnosti chrómu je ale pohlcení zelené a modré složky světla a emise červeného světla. Díky tomu lze dosáhnout monochromatickosti laserového záření.

Optický rezonátor rubínového laseru se skládá z krystalu rubínu ve tvaru válce a zrcadel umístěných na jeho čelech. Jedno z těchto zrcadel je plně reflexní a druhé polopropustné. Napájení je zajištěno zdrojem světla o vysokém výkonu, který obklopuje krystal rubínu. Záblesky bílého světla ze zdroje způsobí excitaci elektronů atomu chrómu do vyšších energetických hladin (díky pohlcení zelené a modré složky světla). Při návratu atomů do rovnovážného stavu, vydávají typické červené světlo. Část tohoto světla se odráží mezi zrcadly a opakovaně prochází rubínovým krystalem. To způsobuje násobení světelného impulsu na velmi vysoké výkony, až dojde k „proražení“ laserového paprsku skrz polopropustné zrcadlo.

Pro účinnost laseru je důležitou charakteristikou koherentnost paprsku. Koherentní znamená, že světelné vlny jsou souběžné a nejsou vůči sobě fázově posunuty. Díky této vlastnosti je laserové světlo schopné cestovat na větší vzdálenosti bez fatální ztráty intenzity. Běžné bílé světlo se skládá z barevných paprsků směřujících různými směry a o různých vlnových délkách, respektive fázových posunech. Toto má za následek relativně velké snížení intenzity na poměrně malé vzdálenosti.

1.1. Zesílení světla [1], [2], [3], [5], [8]

Pro dosažení pracovních výkonů laseru je nutné mnohonásobně zvýšit intenzitu světla. Látku, která toto zajišťuje, nazýváme aktivní médium a je nezbytná pro všechny typy laseru.



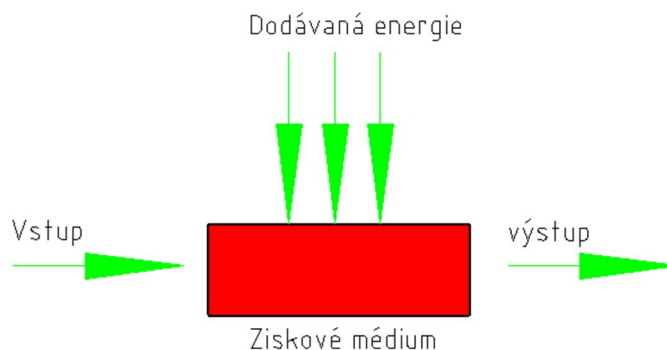
Obr. 1 Zesílení světla

Podle typu laseru se jako zesilující médium používají:

Helium-neonový laser	- směs plynů hélia a neonu
Diodový laser	- tenká polovodičová vrstva
Barevný laser	- fluorescenční barvivo nebo methylalkohol Neodym
YAG (pevnolátkový) laser	- prut ytrium aluminium granátu (YAG) obsahující ionty kovového neodymu.

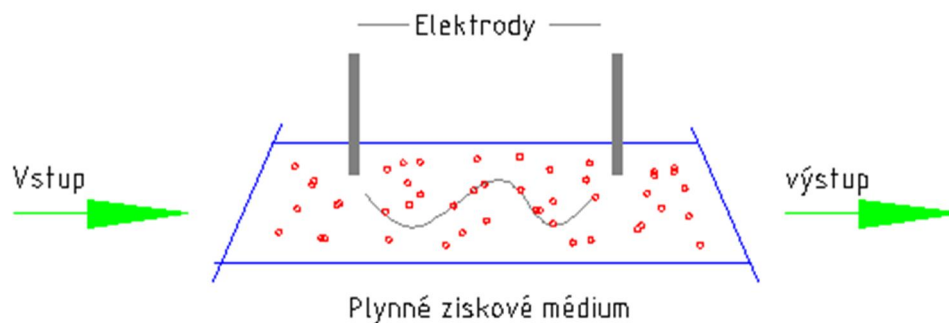
1.2 Buzení aktivního média [1], [2], [3], [5], [8]

Dodávání energie do aktivního média nazýváme čerpání. Zvýšení intenzity světelného paprsku je přímo úměrné energii dodané ziskovému médiu. Samotný způsob čerpání energie záleží na typu laseru. V případě pevnolátkového laseru se zpravidla používá optické čerpání. To je uspořádání, kdy xenonem naplněná zářivka ozařuje čerpanou látku velmi intenzivním světlem (zářivku lze nahradit laserovou diodou). Toto světlo je absorbováno a vyrazí elektrony atomů nebo iontů na vyšší energetické hladiny. Vzhledem k tomu, že světlo zářivky se šíří všemi směry, je obklopena reflexním prostředím, které směřuje světlo na zesilující látku. Tento typ zařízení má výstup impulsního charakteru.



Obr. 2 Princip čerpání energie

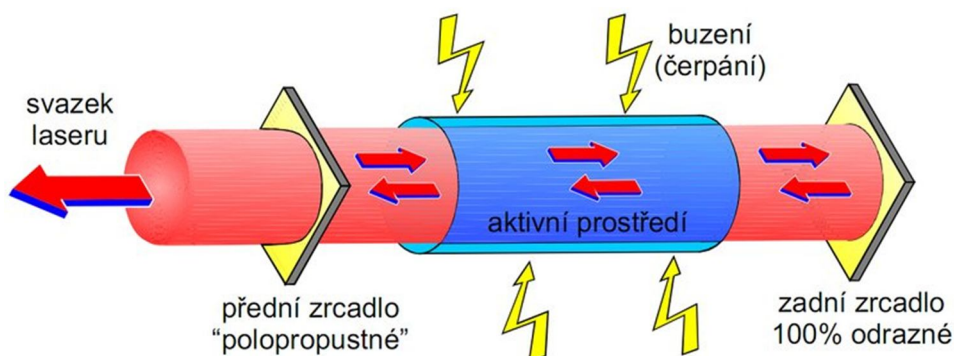
Plynné zesilující médium je většinou čerpáno průchodem elektrického výboje. Proces vybuzení atomů nebo molekul do vyšších energetických hladin závisí na použitém plynu a často je složitý. Kvůli snížení ztrát způsobených odrazem jsou často konce válců, ve kterých je uzavřený plyn, skloněny pod určitým - Brewsterovým úhlem. Výstupní paprsek laseru je polarizovaný.



Obr. 3 Plynné aktivní médium

1.3 Optický rezonátor [1], [5], [8]

Zesilovače pracující na principu popsaném v předchozí kapitole jsou zpravidla používány pouze jako součást laserového systému určená pro zesilování světla specifických vlnových délek.



Obr. 4 Optický rezonátor [5]

Laserový oscilátor je vlastně zesilovač s pozitivní vazbou. Je složen z uzavřené dutiny obsahující aktivní médium a na koncích je uzavřen dvěma zrcadly. Zrcadla jsou zde právě z důvodu zajištění tzv. pozitivní vazby, což znamená, že část světla, které je vyzářeno z aktivního média, je do něj odraženo zpět pro další buzení atomů na vyšší energetické hladiny.

Na koncích oscilátoru jsou dvě různá zrcadla – polopropustné a plně reflexní. Polopropustné zrcadlo odráží mezi 20% až 80%, přičemž hodnota se mění v závislosti na druhu laseru. Výstupní laserový paprsek je pro optický rezonátor ztráta.

2 LASERY POUŽÍVANÉ V PRŮMYSLU [1], [4], [5]

V současných průmyslových aplikacích se používá pět hlavních typů laserů, které jsou uvedeny v tabulce níže. Jednotlivé typy se pak dále dělí podle typu buzení, provozního režimu (kontinuální, pulsní) a dalších parametrů. Každý typ má svoje výhody/nevýhody a typické aplikace, pro které je vhodný.

Tabulka udává zcela základní přehled jednotlivých typů laserů a jednotlivé uvedené parametry je třeba brát s určitou rezervou.

Tab. 1 Základní přehled typů laserů [4]

Laser	Vlnová délka (nm)	Buzení	Efek. ^a	Režim ^b	Výkon / Energie	Typické aplikace ^c	Údržba	Život. (h)
Nd:YAG	1064	LD	~7%	CW	až 6kW	Ř,S	ano	~10 000
		lampy	~3%	pulsní*	~100W	Z,G		~1000
CO ₂	10600	RF	~10%	CW / pulsní	10-250W	Z,G, Ř nk.	ano	~20 000
		El.	~25%		až 5kW	Ř,S		--
Diskový	1070	LD	~15%	CW	až 16 kW	Ř,S	ano	~10 000
Vláknový	1070	LD	~30%	CW	až 80 kW	Ř,S	ne	~100 000
				Pulsní	~1,2kW	Z,G,M		
Diodový	808-980	El.	~60%	CW	až 10kW	S,K,N	ne	~15 000

Základní přehled průmyslových laserů.

^a Efektivita (účinnost) přeměny elektrické energie na světelnou (optickou)

^b U pulsních laserů se udává energie v pulsu a doba pulsu, případně střední výkon (v závorce).

CW - kontinuální, **QCW** - kvazi kontinuální.

^c **Ř** – řezání, **S** - svařování, **Z** – značení, **G** – gravírování, **K** – kalení, **N** – nanášení vrstev, **M** - mikroobrábění, **nk** – dělení nekovů.

Buzení: **LD** - laserové diody, **RF** - radio frekvenčně, **El.** - elektricky (výboj, proud).

2.1 Nd:YAG, vláknový a diskový laser [1] , [4], [5]

Všechny tyto tři typy laserů patří do skupiny pevnolátkových laserů a pracují s vlnovou délkou cca 1 μ m. Zesilujícím médiem je zde YAG krystal (*ytrium aluminium granát*) s ionty neodemu (Nd). Navzájem se tyto typy liší geometrií aktivního prostředí. Hlavní výhodou těchto laserů je možnost vedení paprsku flexibilním optickým vláknem. Díky tomu můžeme přenášet záření z laseru do požadovaného místa obrábění.

2.2 CO₂ lasery [1], [4], [5], [8]

Tyto lasery patří do skupiny plynových laserů. Aktivní prostředí zde tvoří:

- Oxid uhličitý (CO₂) - kolem 10–20 % plasty
- Dusík (N₂) - kolem 10–20 %
- Helium (He) - zbytek směsi plynu

U CO₂ laserů o výkonu do 500W se nejčastěji používá uzavřený (neprůtočný) rezonátor a radio-frekvenční buzení. Tyto lasery vynikají nízkými provozními náklady, vysokou spolehlivostí a dlouhou životností.

Pro výkony 0,5-20 kW jsou používány průtočné rezonátory. To znamená, že aktivní médium rezonátorem neustále proudí. Buzení zde probíhá elektrickým výbojem mezi dvěma elektrodami. Tyto lasery jsou velmi spolehlivé, jejich životnost je uspokojivá, ale provozní náklady jsou vyšší než u předchozího typu.

CO₂ lasery jsou nejpoužívanějším typem pro řezání a svařování kovů. Dále jsou používány ke značení, gravírování a řezání nekovových materiálů, kde není možné použít skupinu laserů o vlnové délce 1 μm.

Ve srovnání s pevnolátkovými lasery má CO₂ laser velkou nevýhodu v problematickém přenášení záření do místa obrábění. Záření CO₂ laseru má vlnovou délku 10,6 μm. Tuto vlnovou délku nelze vést optickými vlákny a je tedy nezbytné použití soustavy zrcadel. Toto řešení vyžaduje pravidelnou údržbu a optickou dráhu je nutné justovat kvůli mechanické nestabilitě.

Hlavními světovými výrobci CO₂ laserů jsou firmy Trumf, Fanuc nebo Bystronic.

3 PŘEHLED PRŮMYSLOVÝCH LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ

3.1 Tepelné zpracování laserem [1], [7], [10]

Při tepelném zpracování materiálu je možné jako zdroj tepla využít laserový paprsek. V tomto případě je laserový paprsek fokusován do plošky s vhodnou intenzitou a lze s ním tak dosáhnout rychlého ohřevu malé a přesně ohraničené oblasti obrobku. Tepelné zpracování laserem aplikujeme zejména pro malá a nebo těžko dostupná místa. Tato technologie našla uplatnění např. v automobilovém průmyslu při realizaci lehkých konstrukcí apod. Tepelné zpracování laserem dosahuje velmi dobrých výsledků při zlepšování odolnosti proti opotřebení, korozi a pittingu.

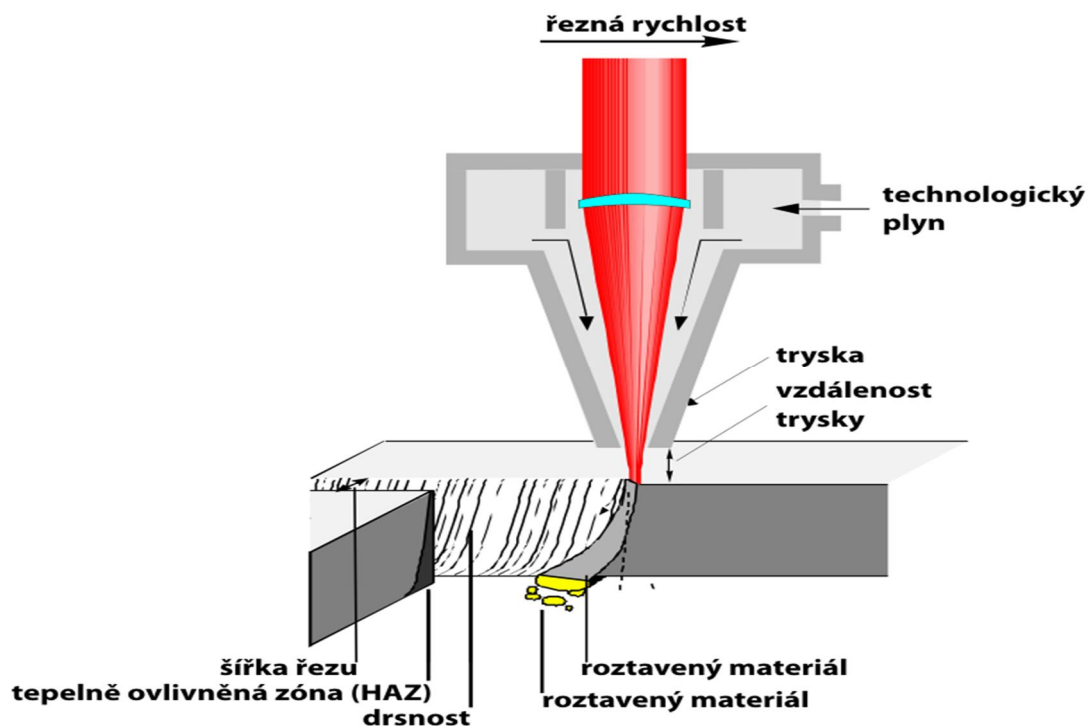
3.2 Svařování laserem [1] , [2] , [3], [7], [10]

Svařování laserem je operace náročná na přesnost a přípravu. Zde je laserový paprsek fokusován do co nejmenší plošky – ohniska. Díky vysoké hustotě výkonu a absenci kontaktu s materiálem lze laserovou technologií svařování dosáhnout velmi úzkého a přitom hlubokého závaru a zároveň splnit obvyklé požadavky na kvalitu svaru jako jsou minimální deformace, mechanické a metalurgické vlastnosti. Dalšími výhodami jsou také vyšší rychlost chladnutí, malá tepelně ovlivněná oblast a také schopnost svařování různých materiálů.

3.3 Řezání laserem [1] , [2] , [3], [6], [7], [8], [10]

Vysoce progresivní metodou dělení materiálu je řezání laserem. Tato metoda v posledních letech vytlačuje klasické postupy díky vysoké výsledné kvalitě, rychlosti a neustálému rozšiřování použitelnosti.

Konvenční nástroj je zde nahrazen teplem laserového paprsku. Paprsek laseru je velmi tenký a jeho energie je tak soustředěna do malého prostoru, což vede k rychlému zahřátí a roztavení materiálu v oblasti řezné spáry. V závislosti na zvolené metodě se část materiálu může dokonce zcela vypařit. Roztavený materiál je z řezné spáry vyfukován proudem plynu souběžným s laserovým paprskem. V závislosti na konkrétním uspořádání strojního celku postupuje řezná spára díky posuvu obrobku vůči zaostřovací optice nebo naopak stůl pro obrobky je stacionární a pohybuje se řezná hlava. Výjimečně je využívána kombinace obou řešení.



Obr. 5 Proces řezání [6]

3.3.1 Interakce mezi laserovým paprskem a materiálem [1] , [8]

Laserový paprsek jako elektromagnetické vlnění reaguje s atomy povrchu pevného tělesa, pole způsobuje vznik elektrického proudu. Jelikož každý materiál má omezenou elektrickou vodivost, vzniká Jouleho teplo a způsobuje prudký nárůst teploty na povrchu. Energie laserového paprsku se dělí na odraženou, absorbovanou a procházející. Poslední jmenovaná složka je nulová pro všechny případy s výjimkou průsvitných materiálů. Čím lepší je elektrická vodivost, tím horší je absorpce. V reálných podmínkách je naprosto zásadní stav povrchu materiálu. Toto bude dále popsáno v kapitole Parametry ovlivňující laserové řezání - parametry obrobku.

3.3.2 Vyfukování materiálu z řezné spáry [1] , [8]

V prvním okamžiku řezání při zapichování laserového paprsku skrz obrobek neprochází tavenina skrz, ale pohybuje se zpět proti směru paprsku. Toto je možné díky tomu, že otvor zápichu má tvar kuželu s vrcholem směrem do materiálu. V okamžiku, kdy dojde k propálení materiálu, pokračuje vyfukování díky tomu, že tavenina je strhávána tečným smykovým napětím vyfukovacího plynu ven z řezné spáry. Čím hustší je plyn, tím větší je smykové napětí. Například argon se používá velmi zřídka, ale lze s ním, díky jeho hustotě, dosahovat velkých řezných rychlostí. Nevýhodou je však vysoká cena plynu.

3.3.3 Metody řezání [1] , [6], [7], [8], [10]

3.3.3.1 Tavné řezání laserem

Tento způsob řezání je založený na principu roztavení materiálu díky soustředěné energii laserového paprsku, kdy je roztavený kov následně vypuzován z řezné spáry proudem inertního plynu. Obvykle se používá argon nebo dusík a tato metoda je vhodná pro neželezné kovy a vysoko legované oceli.

Výhodou této metody je, že můžeme zabránit oxidaci při řezání kovu. Tavné řezání je výrazně rychlejší než sublimační řezání, ale dalším - oxidačním - řezáním lze dosáhnout ještě vyšších řezných rychlostí.

Podskupinou tavného řezání je vysokotlaké řezání, které je založené na vyfukování taveniny z řezné spáry proudem dusíku o tlaku více než 6 barů. Díky vysoké rychlosti, jakou opouští roztavený kov řeznou spáru, je podstatně redukován vznik ostřin a ulpívání strusky na hraně řezu. Jako řezný plyn zpravidla bývá použit dusík, tudíž nedojde k oxidaci.

Vysokotlaké řezání je používáno nejčastěji při dělení nerez ocelí a hliníkových slitin, u těch ale při tloušťkách >3mm začínají vznikat ostřiny. Výhodou je, že není nutná další úprava obrobku obráběním, naproti tomu vyšší spotřeba plynu prodražuje řezání.

3.3.3.2 Sublimační řezání

Při tomto druhu řezání je materiál vypařován - sublimován z oblasti řezné spáry. Tato metoda se používá zejména pro materiály, které lze jen těžko nebo vůbec nelze tavit (keramika nebo dřevo). Pokud bychom chtěli tuto metodu použít pro řezání kovů, vyžaduje velmi vysokou intenzitu laserového paprsku, což je energeticky náročné. Výhodou je však minimální teplem ovlivněná oblast a velmi kvalitní povrch řezu. Řezná hrana téměř nevykazuje rýhovanou strukturu. Sublimační řezání je použitelné pro kovové materiály tloušťky <1mm.

3.3.3.3 Oxidační řezání

Oxidační řezání probíhá obdobným způsobem jako tavné řezání. Roztavený materiál je z oblasti řezné spáry vyfukován proudem plynu, v tomto případě kyslíku. Oproti tavnému řezání dochází mezi kyslíkem a roztaveným kovem k exotermické reakci, což zvyšuje množství tepelné energie uvnitř řezné spáry. Tato metoda se používá téměř výhradně pro řezání kovů.

Charakteristika oxidačního řezání:

- vyšší řezné rychlosti než u sublimačního i tavného řezání
- lze řezat větší tloušťky materiálu než u předchozích metod
- řezné hrany jsou pokryté vrstvou oxidu - okují, kvůli použití kyslíku jako řezného plynu. Ušlechtilé oceli jsou tak znehodnoceny a v tepelně ovlivněné oblasti může docházet ke korozi.
- u obrobků z materiálů legovaných chromem a niklem, určených k následnému svařování, je nutné nejdříve odstranit vrstvu oxidu
- silnější tvorba rýh na řezné hraně a z toho vyplývající horší kvalita povrchu řezu

4 SROVNÁNÍ LASERU A ALTERNATIVNÍCH TECHNOLOGIÍ [1], [6]

Hlavními výhodami laserové technologie ve srovnání s metodami jako elektroeroze, plazmové řezání nebo konvenční vystřihování jsou:

- vysoké řezné rychlosti a z toho vyplývající vysoká produktivita oproti např. elektroerozi
- velmi kvalitní povrch hrany řezu, čímž zpravidla odpadá následné opracování (této problematice bude věnována hlavní kapitola)
- běžné oceli jde řezat bez vzniku ostřin, tím odpadá další operace, což je z kapacitních i ekonomických důvodů výhodné

- velmi malá a konstantní šířka řezné spáry, což umožňuje udržet tolerance v rozmezí 0,05 mm - 0,1 mm bez ohledu na velikost výrobní série
- velmi malá teplem ovlivněná oblast
- obrobek je opracováván bezdotykově, což je ve srovnání s lisováním bezhlučné a bez vibrací

5 MATERIÁLY ŘEZANÉ LASEREM [1], [7] , [8]

Laser je využíván zpravidla pro řezání kovových materiálů:

- stavební oceli
- nástrojové oceli
- nerezavějící a chemicky odolné materiály
- hliník a jeho slitiny
- zvláštní oceli jako pružinová nebo křemíková (problematické)
- titan a jeho slitiny

Laserovým paprskem lze však dělit i materiály jako:

- keramika
- plasty
- keramika
- dřevo
- sklo
- lepenka

6 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ LASEROVÉ ŘEZÁNÍ [1], [7], [8]

Parametry laserového záření:

- výkon laseru
- frekvence pulzů
- mód (rozložení hustoty výkonu)
- stálost výkonu
- geometrie svazku paprsků
- divergence
- polarizace

Parametry procesu:

- řezná rychlost
- druh plynu
- tlak plynu
- tvar a poloha ohniska

Parametry obrobku:

- tloušťka materiálu
- druh materiálu
- povrch materiálu
- geometrie obrobku

6.1 Parametry laserového záření [1], [7], [8]

6.1.1 Výkon laseru

Pro různé druhy a tloušťky materiálu je potřeba použít různé výkony laseru. Maximální tloušťka materiálu zpracovatelného konkrétním laserem je závislá na jeho maximálním výkonu. Postupem času dochází k zanášení zrcadel laseru, snižování jejich transparentnosti, což snižuje celkový výkon laseru.

Výkon každého laseru může být v provozu regulován procentuelně, dle potřeby konkrétního procesu. Například u problematických geometrií, jako jsou velmi tenké můstky výřezů, je nutné snížit výkon a rychlost řezu.

6.1.2 Pracovní frekvence

Tento parametr znamená, že laser pracuje v pulzním režimu. Obdobně jako ostatní parametry je nutné pracovní frekvenci přizpůsobit konkrétnímu problému řezání. Pracovní frekvence se snižuje například při zapichování v rampovém režimu nebo řezání velmi malých součástí.

6.1.3 Mód – rozložení hustoty výkonu

Módem se rozumí rozložení hustoty výkonu v ose směru paprsku a v ose k ní laterální, které je typické pro paprsek laseru.

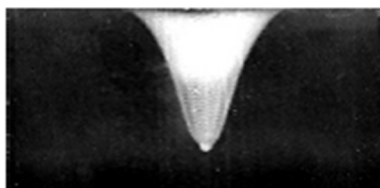
U laserů se používají dva základní módy

- TEM00
- TEM01

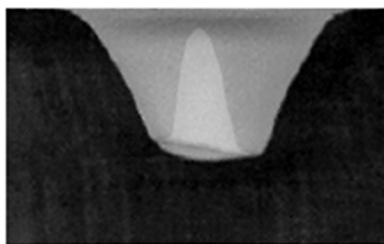
TEM00: Je základním módem a často je označován jako Gaussův mód. Rozložení hustoty má tvar Gausovy křivky s maximální hodnotou na ose paprsku, tzn. intenzita paprsku je na ose paprsku největší a směrem od osy se snižuje.

TEM01: Pro tento mód je rovněž známý název prstencový mód. Funkce intenzity má v tomto případě na ose paprsku nulovou hodnotu a největší intenzita se rozkládá v prstencovité oblasti kolem této osy. TEM01 je vhodný pro lasery s výkonem větším než 3 kW.

Rozložení hustoty výkonu je možné zobrazit tzv. „nastřelením“. To je realizováno krátkým výbojem laserového paprsku do průhledného materiálu jako např. plexiskla.



Obr. 6 Nastřelení módu do plexiskla – základní mód (TEM00) [8]



Obr. 7 Nastřelení módu do plexiskla – prstencový mód (TEM01) [8]

Většina řezných laserů pracuje s tzv. směsným modem superponujícím několik základních módů.

6.1.4 Stálost výkonu

Momentální stálost výkonu je velmi důležitá pro dosažení požadovaných parametrů řezu v jeho celé délce. Závisí zejména na tlaku a teplotě plynu.

Z provozního hlediska je důležitá také dlouhodobá stálost výkonu. Výstupní výkon laserového agregátu je snižován z důvodů zanášení laserové optiky a také opotřebení trubic.

6.1.5 Variabilní výkon laseru

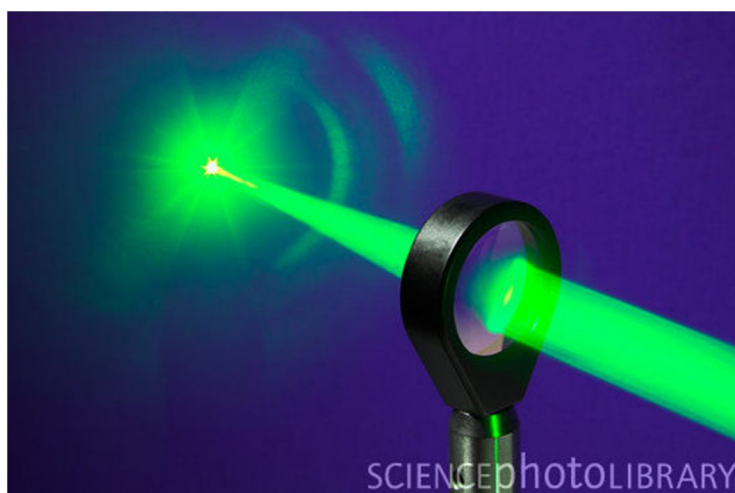
V mezních případech jako je řezání vysokou rychlostí, případně materiálů velkých tloušťek, může docházet ke vzniku poruch řezu. Při programování je výkon laseru volen v procentech vzhledem k maximálnímu výkonu laserového agregátu. Pokud tedy dojde k výskytu vady řezu, je vhodné ověřit, zda procentní údaj odpovídá hodnotě ve Watech.

6.1.6 Geometrie laserového paprsku

Průměr laserového paprsku má velký vliv na hustotu jeho energie. Průměr laserového paprsku v místě interakce s obrobkem závisí na poloze ohniska vzhledem k povrchu obrobku. Výkon a průměr laserového paprsku v místě interakce s obrobkem přímo určují hodnotu hustoty výkonu.

Fokusace

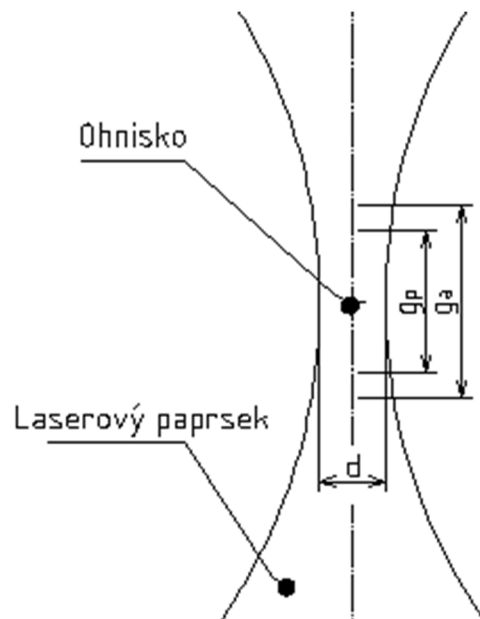
V praxi se pro proces získávání optimální geometrie paprsku zažil název fokus nebo fokusace. Optický fokusační systém zabezpečuje požadované geometrické charakteristiky a tím hustotu výkonu laserového paprsku v zóně interakce s obrobkem.



Obr. 8 Ilustrační obrázek fokusace [9]

Geometrické parametry jsou:

- průměr ohniskové oblasti
- podélný rozměr ohniskové oblasti
- velikost aktivního úseku



Obr. 9 Schéma geometrických parametrů [1]

g_p - podélný rozměr ohniskové oblasti.

Jeho velikost se určí jako vzdálenost mezi průřezy laserového paprsku, ve kterých je intenzita poloviční proti intenzitě v ohnisku

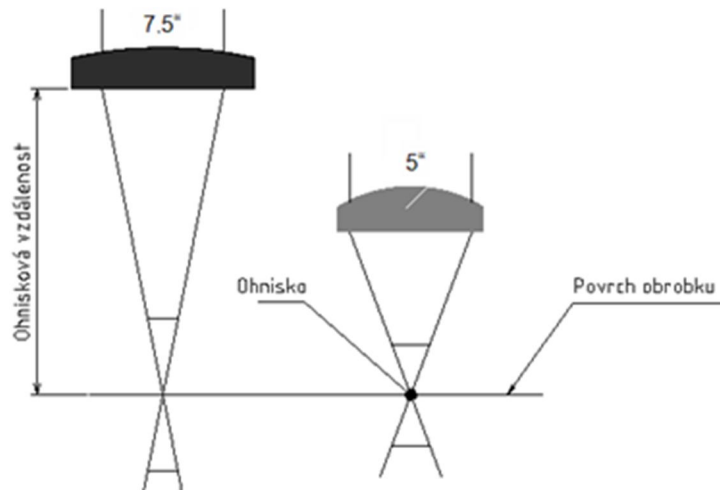
g_a - aktivní úsek

Je to vzdálenost mezi průřezy, ve kterých se intenzita na ose rovná kritické intenzitě potřebné k protavení dané tloušťky materiálu.

Přesný výpočet těchto parametrů je velmi problematický, neboť se vzájemně ovlivňují. Doporučené parametry jsou obvykle zjištěny experimentálně a vyneseny do grafů. Výsledek řezání je silně závislý na správné fokusaci, tedy volbě čočky a nastavení paprsku. Celý svislý rozměr průřezu děleného obrobku musí ležet v aktivním úseku. V opačném případě dojde k neprořezání materiálu. V praxi nastavujeme posuv aktivního úseku v milimetrech, taktéž nazývaný fokus, abychom dosáhli optimální polohy ohniska vůči obrobku a tím správného výsledku řezání.

Šířky řezné spáry a kvalita řezu je přímo závislá na průměru ohniska. Platí zde závislost, že čím větší je průměr svazku paprsků, tím menší průměr ohniska lze dosáhnout.

V případě použití zaostřovací čočky s ohniskovou vzdáleností 7,5“ dosahujeme obvykle průměr ohniska $< 0,12$ mm. Čočka o ohniskové vzdálenosti 5“ pak zajistí ohnisko průměru do $< 0,2$ mm.



Obr. 10 Geometrie paprsku v závislosti na zakřivení čočky

6.1.7 Divergence

Divergence je rozbíhavost laserového svazku z laseru. Pokud bude divergence 1 mrad/m, laserový paprsek se rozšíří na každém metru vzdálenosti o 1 mm

U strojů, kde je obrobek stacionární a pohybuje se optika, má divergence velký význam. Snažíme se dosáhnout jeho co nejmenší hodnoty, aby bylo možné udržet konstantní vlastnosti paprsku a tím i řezu pro jakékoliv místo pracovního prostoru stroje.

Prostředkem minimalizace divergence je optický teleskop. Ten je vestavěný v rámci optické trasy. Paprsek, který teleskopem prochází, je rozšiřován na 1,5-2 násobek původního rozměru současně se snížením divergence pod hranici 1 mrad.

V případě strojů se stacionární optikou (pohybuje se obrobek) celý tento problém odpadá.

6.1.8 Polarizace

Pro kvalitní dělení materiálu laserem je velmi důležité zajistit kolmost řezné hrany. Lineární nebo eliptická polarizace nevede k dobrým výsledkům, proto se v souvislosti s laserovým dělením materiálu využívá kruhové polarizace.

Chybu polarizace rozpoznáme při vyříznutí čtverce materiálu. Hrany dvou protilehlých řezů jsou kolmé, kdežto dvě zbývající hrany jsou tzv. „podřezány“. U těchto hran hovoříme tzv. „tvaru střechy“ jelikož hrana se směrem dolů rozšiřuje. V případě dělení materiálu o síle blížící se maximu pro daný stroj by mohlo dojít k tomu, že materiál nebude rozdělen.

6.2 Parametry řezného procesu [1], [7], [8], [19]

6.2.1 Řezná rychlost

Řeznou rychlost volíme v závislosti na druhu děleného materiálu a jeho tloušťce. Vždy je nutné najít optimální rychlost pro konkrétní případ řezání, neboť jak vysoká, tak i příliš nízká rychlost řezání vede ke snížení kvality nebo poruchám řezu (vznik otřepů, závarů nebo zvýšení drsnosti řezu).

Platí závislost, že se zvyšující se tloušťkou materiálu se maximální dosažitelná řezná rychlost snižuje.

6.2.2 Odhad řezné rychlosti

Pro dělení materiálu laserem je možné orientačně určit řeznou rychlost za následujících podmínek.

Energii řezání negativně ovlivňují tyto parametry:

- tepelné ztráty vedením v materiálu
- vyzařování tepla do okolí
- ochlazování plynem při vypuzování

Za předpokladu že:

- zanedbáme ztráty vedením tepla do obrobku, vyzařováním tepla a ochlazování plynem. (Tyto příspěvky jsou velmi malé při vysokých rychlostech řezání, úzké řezné spáře a nízkém tlaku plynu).
- na hraně řezu je dosaženo teploty tavení
- tavený materiál reaguje s kyslíkem v celém objemu
- proud plynu vystupuje koaxiálně s laserovým paprskem

Je možné definovat energetickou bilanci procesu:

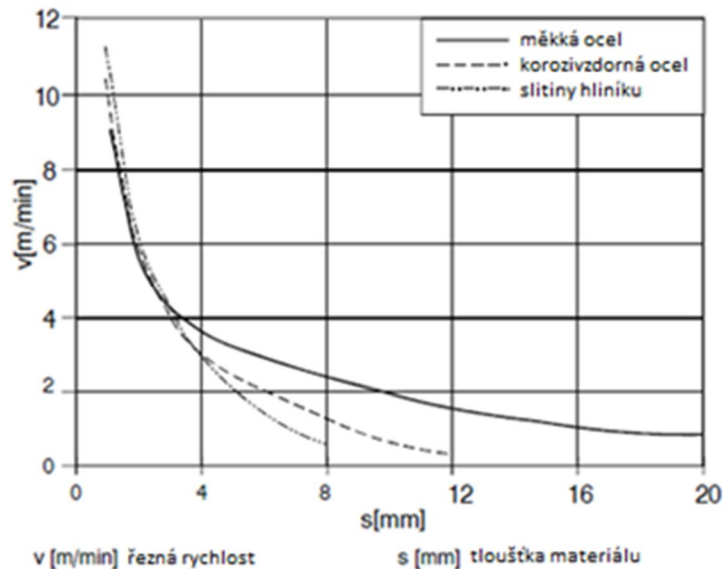
$$P_L + P_R = P_S$$

- P_L – výkon laseru absorbovaný materiálem
- P_L – teplo exotermické reakce kyslíku s materiálem za jednotku času
- P_R – spotřeba energie nezbytné pro ohřev a odpaření materiálu z řezné spáry

$$v_s = \frac{P_L}{\rho \cdot s \cdot b \cdot (\Delta G_s - \Delta GR)}$$

Kde:

- v_s – řezná rychlost
- ρ – hustota materiálu
- s – tloušťka materiálu
- b – šířka řezné spáry
- ΔG_s – změna sublimační energie na kilogram materiálu
- ΔGR – reakční teplo na kilogram materiálu



Obr. 11 Závislost řezné rychlosti na tloušťce a druhu materiálu [8]

6.2.3 Druhy plynu

Druhy plynu volíme podle druhu řezaného materiálu a požadované kvality řezu. Problém by mohl nastat například u řezání titanu kyslíkem, kdy dochází ke vzniku oxidů na řezné hraně, které by ovlivňovaly následné svařování. Rovněž v případě dělení hořlavých materiálů nesmí být použit jako řezný plyn kyslík.

Při řezání kyslíkem je pro výslednou kvalitu velmi důležitá čistota použitého kyslíku (doporučená čistota 99,95%). Například při výměně láhví (pokud není použita velkoobjemová nádrž na plyn) může dojít ke znečištění dusíkem nebo vodní parou. To pak má zpravidla za následek tvorbu otřepů.

Při dělení korozivzdorných ocelí se ve většině případů používá jako řezný plyn dusík. Jeho kvalita má naprosto zásadní význam pro výsledek řezání. Výrobcem doporučená čistota je 99,999%. Pokud dojde ke znečištění kyslíkem hrana řezu bude oxidovat (žluté zabarvení), dojde ke tvorbě otřepů a tím ke zhoršení drsnosti plochy řezu.

6.2.4 Tlak plynu a geometrie trysky

Tlak plynu se volí v závislosti na druhu a tloušťce opracovávaného materiálu. Řezání kyslíkem je náchylnější na špatnou volbu tlaku než řezání dusíkem. Při řezání kyslíkem se řezou tenké materiály vysokým tlakem a silné materiály tlakem nižším.

Při vysokotlakém řezání dusíkem se naopak řezou silnější obrobky vyšším tlakem, dostatečným k vypuzení husté taveniny z prostoru řezu.

Pro správné vyfukování taveniny z řezné spáry při tavném nebo oxidačním řezání je důležitý nejen tlak plynu, ale také geometrie řezné trysky. Trysku vždy volíme dle konkrétního úkolu řezání. Obecně platí, že pro větší tloušťky materiálu používáme větší průměr trysky, neboť i řezná spára je širší (konkrétní údaje uvedeny v experimentální části). Trysku volíme také v závislosti na metodě řezání. Při vysokotlakém řezání se používají trysky s větším otvorem než při řezání standardním tlakem. Velké problémy může způsobit oválný nebo jinak kolízí zdeformovaný otvor trysky. Tento stav se projeví zejména v místech změny směru řezání.

6.3 Parametry obrobku [1], [7], [8], [11], [19]

6.3.1 Tloušťka materiálu

V případě dělení kovových materiálů platí, že čím větší je tloušťka materiálu, tím vyšší je výkon potřebný k rozdělení materiálu. S tloušťkou materiálu rovněž roste drsnost povrchu řezu. Větší tloušťky materiálu je také možné řezat při stejném výkonu a nižší řezné rychlosti, než v případě materiálu nižší tloušťky.

6.3.2 Druh materiálu

Každý druh materiálu má své specifické vlastnosti dané chemickým složením, mikroskopickou strukturou apod. O dělitelnosti materiálu laserovým paprskem rozhodují zejména tyto vlastnosti:

Odrazivost materiálu – podle této vlastnosti volíme vlnovou délku laserového paprsku respektive typ laseru. Odrazivost definujeme jako poměr množství odražené energie vůči dopadající energii.

Absorpce materiálu – převrácená hodnota odrazivosti. Určuje schopnost měnit energii laserového paprsku na teplo.

Tepelná vodivost – určuje velikost tepelně ovlivněné oblasti. Vyjadřuje rychlost šíření tepelné energie.

Tepelná kapacita – vyjadřuje množství tepelné energie vložené do materiálu respektive schopnost materiálu toto teplo ukládat.

Teplota tání - teplota, při které látky přechází ze skupenství pevného do kapalného.

Teplota sublimace - při této teplotě dochází k přeměně pevného skupenství látky na plynné.

Pro představu je zde zařazena tabulka termofyzikálních a optických vlastností vybraných kovů.

Tab. 2 Tabulka termofyzikálních a optických vlastností vybraných kovů [19]

Prvky v čisté formě	Odraznost R ($\lambda=10,6\mu\text{m}$)	Absorpce A ($\lambda=10,6\mu\text{m}$)	Tepelná Vodivost $\lambda[\text{W/cmK}]$	Měrná tepelná kapacita C[Ws/gK]	Teplota Tavení $T_s [\text{K}]$	Parametry možnosti řezání s
Hliník	0,98	0,02	2,2	0,9	933	12,5
Železo	0,96	0,04	0,8	0,45	1808	3,19
Měď	0,985	0,015	3,9	0,38	1356	7,96
Molybden	0,97	0,03	1,3	0,25	2893	10,6
Nikl	0,97	0,03	0,81	0,45	1726	6,2
Stříbro	0,99	0,01	4,2	0,23	1234	125,16
Tantal	0,95	0,05	0,56	0,14	3273	1,7
Titan	0,92	0,08	0,22	0,52	1943	0,15
Wolfram	0,97	0,03	1,8	0,13	3653	18,3
Zinek	0,97	0,03	1,1	0,38	693	2,29
Zlato	0,985	0,015	3,1	0,13	1336	46,18

Železné materiály

Vysoký obsah uhlíku způsobí vytvrzení materiálu podél řezné hrany. V případě oxidačního řezání vznikají řezné hrany s dobrou drsností, ale u malých obrysů hrozí upálení rohů.

Při oxidačním řezání chromniklových korozivzdorných ocelí vzniká velmi hustá tavenina z oxidu chrómu a niklu. Z tohoto důvodu je nutné snížit výkon, řeznou rychlost a zvýšit tlak plynu, neboť zde hrozí přehřátí dolní části řezné hrany a tím vznik pittingu.

Neželezné materiály

Slitiny hliníku jsou problematické kvůli tepelné vodivosti a vysoké odrazivosti. Vhodnost materiálu k dělení laserem záleží na legování. Vyšší podíl legujících prvků má pozitivní efekt. Proto tzv. polotvrdý hliník = AlMg3 lze řezat lépe než čistý hliník. Používá se vysokotlaké řezání dusíkem.

Titanové materiály

Titan reaguje s dusíkem, proto se pro jeho řezání používá argon. Řezání titanu je energeticky náročné a s uspokojivou kvalitou je možné do 6 mm tloušťky.

Silně problematické je dělení mosazi a mědi kvůli jejich velmi vysoké reflexivitě. Zlato a stříbro je laserovým paprskem téměř nedělitelné.

6.3.3 Povrch obrobku

Povrch obrobku je pro řezání laserem naprosto zásadní. Prvním předpokladem pro dělení materiálu laserem je funkční interakce mezi povrchem obrobku a laserovým paprskem. Schopnost povrchové vrstvy pohlcovat nebo do jisté míry odrážet paprsek určuje vhodnost materiálu pro dělení laserem. Lesklé povrchy tedy zhoršují výsledek řezání. Typickým zástupcem takto problematického materiálu je hliník. Výsledek řezání také negativně ovlivňuje vrstva okujů na povrchu obrobku. Na výsledky řezání mají také vliv ostatní úpravy povrchů jako například vrstvy laků, barev, krycí fólie a poplastování. Bezproblémové řezání tedy dovolují matné a drsné materiály. Positivní vliv má také vrstva oleje, která při zapichování zredukuje množství nahromaděné strusky na povrchu obrobku. Naopak pokud bude obrobek pokryt vrstvou rzi nebo okujů, kyslík obsažený v těchto oxidech způsobí další přívod energie do reakce a s největší pravděpodobností dojde ke vzniku vypálenin a pittingu. Nejlepších výsledků řezání dosahujeme s povrchy opískovanými, válcovanými za studena a leptanými.

Tab. 3 Vliv stavu povrchu na koeficient absorpce oceli 35NCD16 [1]

Stav povrchu	Průměrná drsnost povrchu [μm]	Absorpce CO ₂ laser [%] $\lambda=10,6 \mu\text{m}$	Absorpce CO laser [%] $\lambda=5,3-5,6 \mu\text{m}$	Absorpce YAG laser [%] $\lambda=1,06 \mu\text{m}$
Leštěný	0,02	5,15-5,25	8,55-8,7	29,75-30
Broušený	0,21	7,45-7,55	12,85-12,95	38,9-40,1
Broušený	0,28	7,7-7,8	13,1-13,2	40,2-41,4
Válcovaný	0,87	9,95-6,05	10,15-10,35	33,8-34,2
Válcovaný	1,1	6,35-6,45	10,85-11	34,1-34,4
Válcovaný	2,05	8,1-8,25	13,5-13,7	41,8-42,5
Válcovaný	2,93	11,6-12,1	19,85-20,6	52,8-53,2
Válcovaný	3,35	12,55-12,65	21,35-21,5	51,4-51,7
Pískovaný	1,65	33,85-34,3	42,4-42,8	38,2-38,4
Broušený +koloidní grafit	-	74-76	77,78	88-92

Pokud bychom narazili na problém estetiky obrobku například kvůli poškrábání povrchu od roštu laseru nebo jiné manipulační poškození je možné materiál chránit umělohmotnou fólií. Tento postup však vyžaduje dodržení několika podmínek. Například pro korozivzdornou ocel je potřeba zajistit, aby se fólie odpařila před zapíchnutím a najetím do řezu. Dalším kritériem je druh lepidla. Zde je doporučován přírodní kaučuk o vrstvě 100 μm .

7 HODNOCENÍ KVALITY ŘEZU LASEREM [8]

Posuzování kvality výsledné hrany řezu je vhodné rozdělit na dva pohledy a to posouzení podle normy a hodnocení z technologického hlediska.

Norma DIN EN ISO 9013 je jakýmsi shrnutím standardů DIN EN ISO 9013:1995-05 „Oxyacetylene flame cutting“ (oxidační acetylenové řezání plamenem), DIN 2310-4 „Plasma cutting“ (plasmové řezání) a DIN2310-5 „Laser cutting of metallic materials“ (laserové dělení kovových materiálů) doplněné o vzájemné souvislosti.

Tato norma zahrnuje standarty, podle kterých je hodnocena kvalita ploch řezu laserem s rozdělením do tříd jakosti 1-4 (uvedeno v kapitole vyhodnocení experimentu řezání). Požadovaná jakostní třída se obvykle uvádí na výkresech součásti určené pro výrobu laserem a má svoji standardizovanou značku. Další částí této normy je hodnocení odchylek délkových rozměrů při tepelném dělení materiálů. Všechny tyto kritéria jsou stanovena pro materiály o tloušťce 0.5 až 40 mm.

Posuzování kvality řezu z technologického hlediska zahrnuje některé parametry obsažené v normě DIN EN ISO 9013 a k nim přidává některé další. Výsledné rozdělení je pak:

- vznik otřepů
- vlastnosti řezné spáry
- pitting
- stopa řezu laserem
- hodnocení drsnosti dle Rz
- kolmost a tolerance sklonu řezu

7.1 Vznik otřepu

Zde posuzujeme, zda vzniknou nebo nevzniknou viditelné otřepy a případně jejich typ a velikost. Z tohoto hodnocení pak odvozujeme, jestli otřepy dosahují parametrů, kdy už je nezbytné jejich odstranění, případně změna parametrů řezného procesu.

Otřepy rozdělujeme do těchto dvou skupiny:

- silně adhesivní otřepy, které lze odstranit pouze dalším obráběním
- málo adhesivní otřepy, zpravidla ulpívající struska snadno odstranitelná bez dalšího obrábění

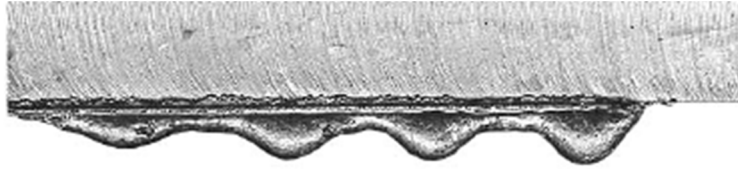
Posouzení je zpravidla vizuální, pouhým lidským okem.

Vznik, případně velikost otřepů, závisí zejména na fokusaci laserového paprsku.

Typy otřepů:

Slzovité otřepy

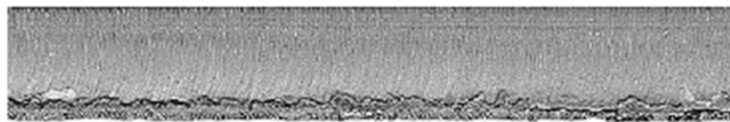
- silně adhesivní
- povrch bez otřepů čistý, kovový



Obr. 12 Slzovitý otřep - měkká ocel tloušťky 15 mm, fokusace +5 [8]

Struskovité otřepy

- velmi křehké
- lze poměrně snadno odstranit



Obr. 13 Struskovitý otřep - měkká ocel tloušťky 15 mm, fokusace -1 [8]

Špičaté otřepy

- vznikají zejména u korozivzdorných ocelí
- silně adhesivní
- velmi drsná dolní část řezu

Obr. 14 Špičatý otřep - korozivzdorná ocel tloušťky 8 mm, fokusace -4 [8]

Může nastat případ, kdy otřepy nezůstanou na ploše řezu, ale pouze přichyceny na dolní straně obrobku

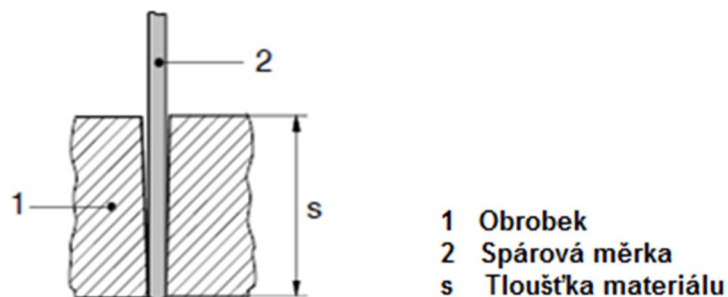


Obr. 15 Špičatý otřep - korozivzdorná ocel tloušťky 8 mm, fokusace -11 [8]

7.2 Vlastnosti řezné spáry

Řezná spára je často označována přímo jako šířka řezu udávaná v milimetrech. Tato průchozí drážka vznikající během laserového řezání se obvykle směrem do hloubky obrobku zužuje. To způsobuje podřezání, to znamená, že na horní hraně obrobku naměříme kratší délkový rozměr než na hraně dolní. Tento problém se objevuje u obrobků o tloušťce vyšší než 3 mm a se stoupající tloušťkou se zvětšuje.

Podřezání (úhel řezné hrany) se hodnotí podle podřezu na vypáleném obdélníku. Šířka řezu se měří spárovými měrkami.



Obr. 16 Měření šířky řezu spárovými měrkami [8]

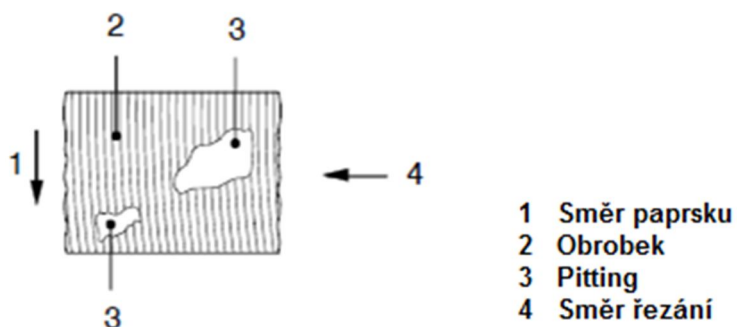
Šířka řezné spáry je vždy zaznamenávána strojem přímo v průběhu řezání.

Tab. 4 Tabulka šířky řezné spáry v závislosti na tloušťce a druhu materiálu

Materiál	Tloušťka materiálu [mm]	Šířka spáry [mm]
Měkká ocel	1-3	0,15
	4-6	0,2-0,3
	-15	0,35-0,4
	20	0,5
Korozivzdorná ocel	1-3	0,15
	4-8	0,2
	10-12	0,5
Slitiny hliníku	1-3	0,15
	4-8	0,2-0,3

7.3 Pitting

Pitting jsou vady řezu - eroze materiálu o nerovnoměrné tloušťce a hloubce a narušují tak sourodost plochy řezu.

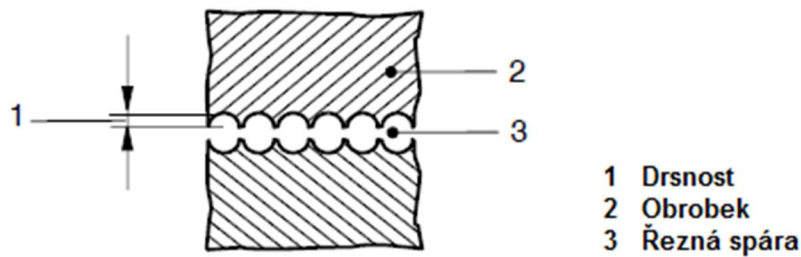


Obr. 17 Nákres – Pitting [8]

Při hodnocení kvality řezu je pitting posuzován podle typu a slovně popsán. Pokud nedojde k výskytu pittingu tak toto kritérium zanedbáváme. Eroze materiálu vznikající při změně směru jsou posuzovány samostatně.

7.4 Drsnost povrchu řezu [8], [12], [13]

Drsnost je v podstatě hloubka vrubů (výška výčnělků) v řádech mikrometrů. Při řezání laserem posuzujeme drsnost podélnou, tzn. ve směru řezání.

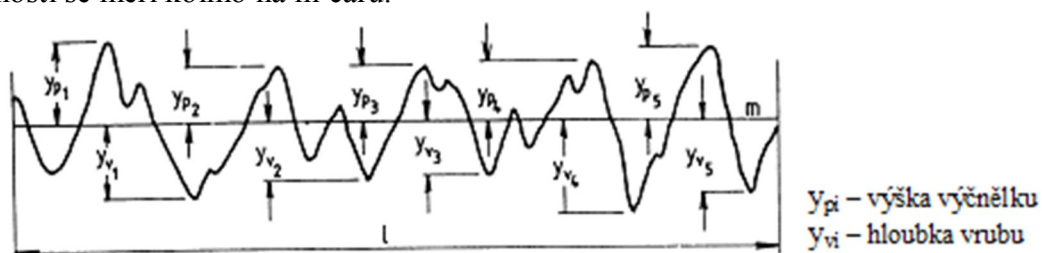


Obr. 18 Nákres drsnosti – pohled shora [8]

Hodnota drsnosti R_z je aritmetický průměr výsledků pěti měření provedených na jednotlivých součástech. Drsnost je udávána v mikrometrech.

a) Posouzení drsnosti povrchu dle výšky nerovnosti R_z :

Výška nerovnosti R_z vychází z hodnot středních vzdáleností mezi pěti nejvyššími a nejnižšími body úseku, ve kterém bylo provedeno měření. Jednotlivé hodnoty střední vzdálenosti se měří kolmo na m-čáru.



Obr. 19 Profil povrchu materiálu [13]

Vzorec pro výpočet parametru R_z :

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{j=1}^5 |y_{vj}|}{5}$$

Průměrná drsnost se měří zařízením odpovídajícím normě ISO 3274. Samotné měření probíhá podle ISO 4288 a jednotlivé hodnoty jsou měřeny v předepsaných intervalech ve směru řezání.

Místo, ve kterém měříme drsnost závisí na tloušťce, druhu materiálu a také na požadovaném standartu kvality. Obvykle vizuálně odhadneme místo s nejlepší drsností a použijeme ho pro první měření. Standardní procedura měření pak zahrnuje měření v horní třetině plochy řezu a následně v třetině dolní.

Drsnost roste směrem od horní strany obrobku ke straně dolní. Toto však zcela platí pouze v případě měkké oceli o tloušťce větší než 8 mm. U hliníku a korozivzdorných ocelí se na tuto závislost spolehnout nemůžeme.

Tab. 5 Tabulka obvyklých drsností v závislosti na druhu a tloušťce materiálu udávaná firmou TRUMPF [8]

Tloušťka materiálu [mm]	Měkká ocel Max. R_z [μm]	Korozivzdorná ocel Max. R_z [μm]	Hliník Max. R_z [μm]
1	9	6	18
1,5	8	-	13
2	15	10	17
2,5	7	-	14
3	17	10	22
4	5	10	20
5	6	10	19
6	6	13	14
8	7	19	46
10	28	43	-
12	23	38	-
15	28	-	-
20	28	-	-

Kvalita drsnosti povrchu řezu je vždy závislá na aktuálním technickém stavu stroje. Zejména zanesená optika, ale i další provozní opotřebení mají zásadní vliv na dosažené výsledky řezání.

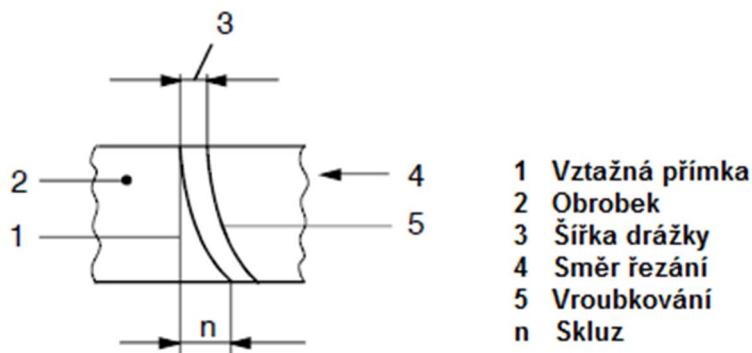
Pitting je nutné uvažovat samostatně a nezahrnovat jej to hodnocení drsnosti, neboť jeho rozměry daleko přesahují měřitelný rozsah měřících zařízení.

7.5 Vroubkování řezné hrany

Při dělení materiálu laserem vzniká na ploše řezu charakteristický reliéf rýhování. Při nízkých řezných rychlostech je rýhování téměř paralelní s laserovým paprskem. Čím je ale řezná rychlost vyšší, tím větší je zakřivení drážek rýhování. Toto zakřivení je vždy ve směru opačném na směru řezání. Separace drážky řezu n je největší vzdálenost mezi dvěma drážkami ve směru řezu.

Separaci drážky řezu posuzujeme vizuálně.

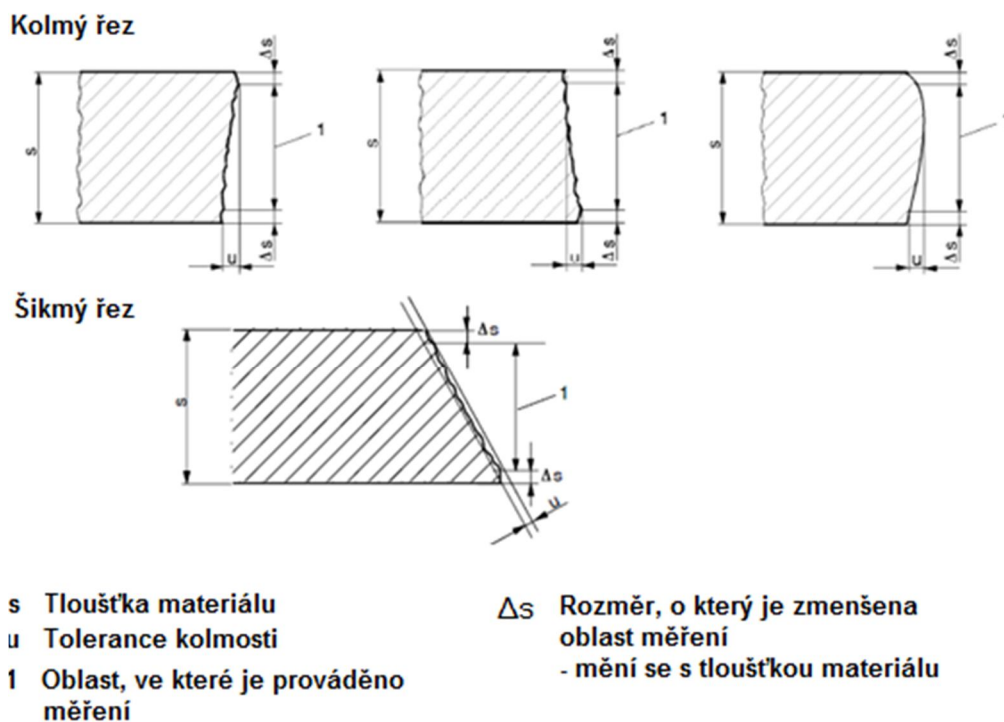
Hodnocení může být upřesněno pomocí lupy či mikroskopu. Referenční drážku řezu nazýváme konstrukční.



Obr. 20 Schéma měření separace drážky řezu (skluz) [8]

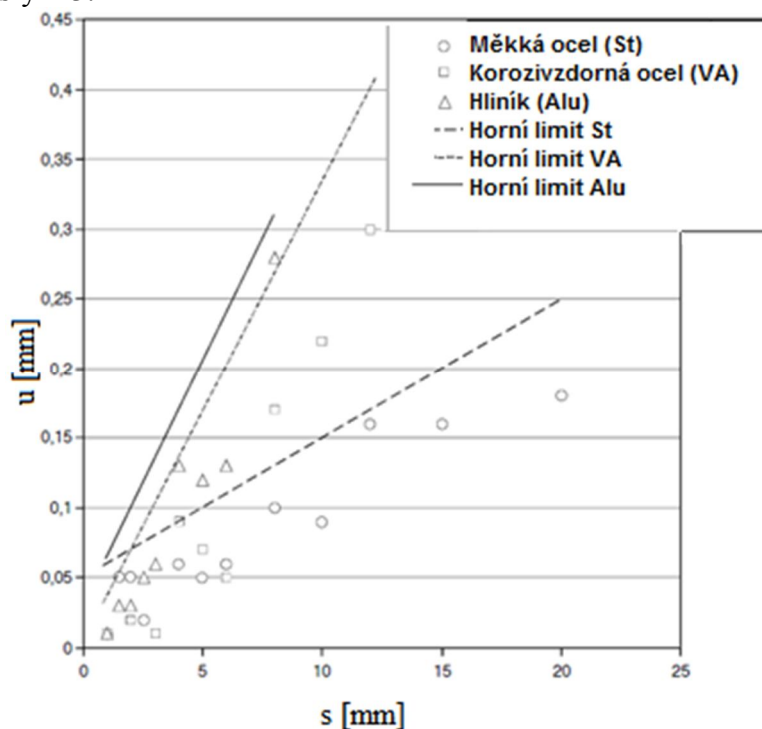
7.6 Kolmost a tolerance sklonu řezu

Kolmost a tolerance sklonu řezu je vzdálenost mezi dvěma paralelními přímkami, mezi kterými musí mít profil plochy řezu úhel menší než požadovaný úhel. V případě kolmých řezů je to tedy 90° . Tolerance kolmosti, případně požadovaného úhlu zahrnuje také přímota a rovinnost řezu. Tyto hodnoty jsou měřeny a udávány v milimetrech.



Obr. 21 Měření sklonu řezu [8]

Norma DIN EN ISO 9013 určuje tři skupiny přesnosti sklonu řezu laserem. Jsou značeny čísly 1-3.



Obr. 22 Závislost tolerance sklonu řezu na tloušťce a druhu materiálu [8]

8 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU [8], [12], [13]

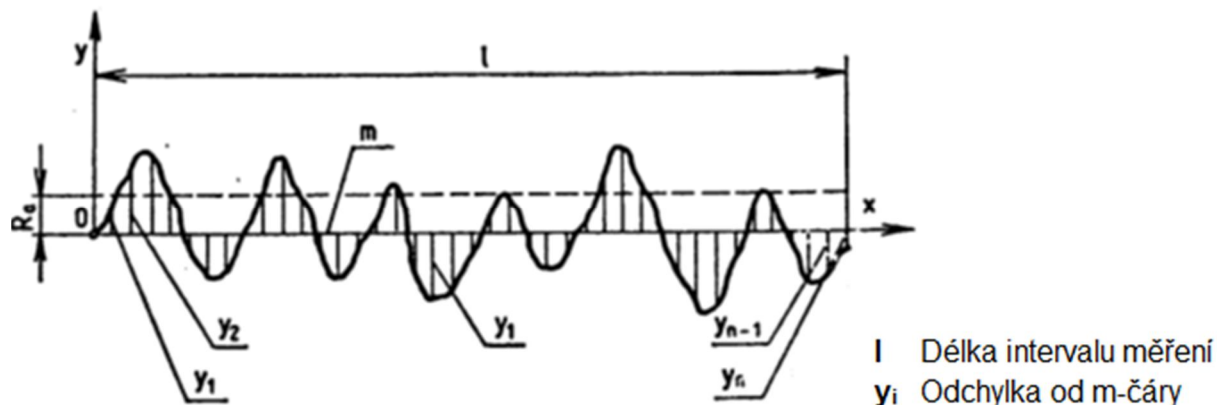
Drsnost je souhrn odchylek od ideálně rovné plochy. Tyto nerovnosti (vruby a výčnělky) mají velikost v řádech mikrometrů. Vznik nerovností je způsoben vlivem výroby a nelze zde počítat náhodné vady materiálu, poškození při manipulaci apod. Drsnost posuzujeme ve směru převládajících nerovností tj. v podélném nebo příčném směru. Skutečný profil daného povrchu získáváme měřením velikostí jednotlivých odchylek od průsečnice s kolmou nebo šikmou rovinou.

8.1 Metody hodnocení drsnosti povrchu

Hodnocení drsnosti povrchu provádíme pomocí kvantitativních metod. Výstupem z nich jsou pak číselné parametry R_a , R_z , případně R_z DIN. Hodnoty naměřené měřicím zařízením (komparátorem) se vztahují k nulové hodnotě komparátoru. Drsnost však posuzujeme (dle doporučení ISO) vzhledem ke střední čáře (tzv. m-čáře). V takto definované soustavě posuzujeme drsnost podle střední aritmetické úchylky R_a a výšky nerovností R_z . V praxi se také vyskytují případy, kdy je vhodné posouzení drsnosti R_z podle normy DIN (tzv. R_z DIN).

a) Posouzení drsnosti dle střední aritmetické úchylky R_a :

Střední čára profilu (m-čára) kopíruje geometrii profilu a zároveň jej rozděluje tak, že součet čtverců odchylek profilu od střední čáry je velmi malý. Tuto závislost si lze představit jako rovnost ploch, které vymezuje profil pod a nad střední čárou.



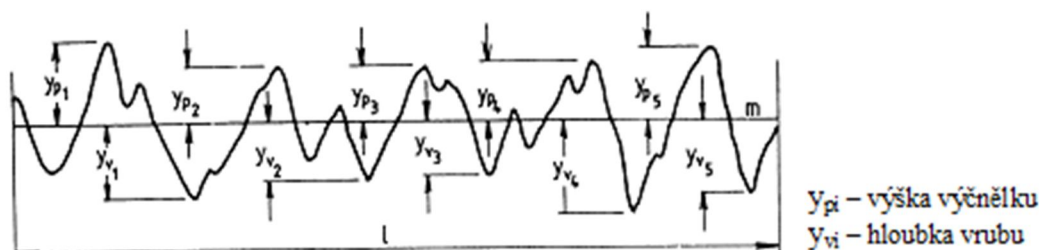
Obr. 23 Profil povrchu materiálu – posouzení R_a [13]

Vzorec pro výpočet parametru R_a :

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| = \frac{|y_1| + |y_2| + \dots + |y_n|}{n}$$

b) Posouzení drsnosti povrchu dle výšky nerovnosti Rz:

Parametr Rz vychází z hodnot středních vzdáleností mezi pěti nejvyššími a nejnižšími body úseku, ve kterém bylo provedeno měření. Jednotlivé hodnoty střední vzdálenosti se měří kolmo na m-čáru.



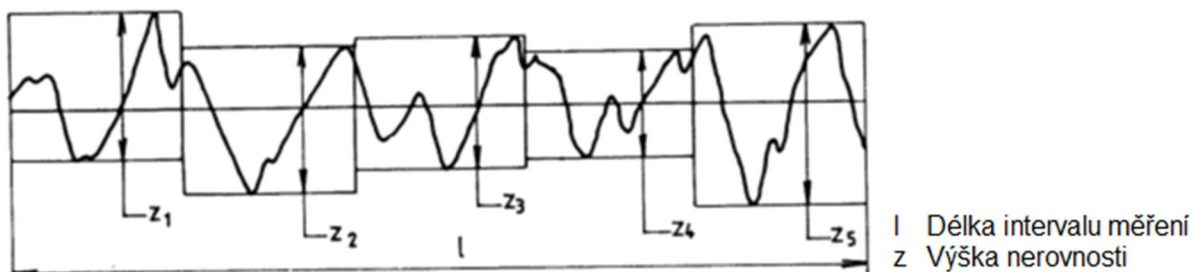
Obr. 24 Profil povrchu materiálu – posouzení Rz [13]

Vzorec pro výpočet parametru Rz:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{j=1}^5 |y_{vj}|}{5}$$

c) Posouzení drsnosti dle výšky Rz DIN:

Parametr Rz DIN je aritmetický průměr pěti největších výšek nerovností.



Obr. 25 Profil povrchu materiálu – posouzení Rz DIN [13]

Vzorec pro výpočet parametru Rz DIN:

$$R_{zDIN} = \frac{1}{5} (z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5)$$

Stanovení polohy střední vztažné čáry lze provést jednoduchou grafickou metodou. Na milimetrový čtverečkový papír zaneseme ve vhodném měřítku velikosti jednotlivých nerovností podle jejich polohy v měřeném úseku. Tímto získáme průběh profilu. Dále pokusně umístíme m-čáru a porovnáme počet čtverečků nad a pod m-čárou. Na základě výsledku provedeme korekce v poloze čáry a postup opakujeme, dokud nebude dosaženo stejného počtu čtverečků na obou stranách.

9. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

9.1 Použité materiály [14], [16], [17], [20]

DC 01 (11 320)

Tab. 6 Chemické složení materiálu DC 01 (11 320) dle normy ČSN EN 10025-2 [20]

materiál	max C	max Si	max Mn	max P	max S	Ti	Cu	min Al
DC 01	0,11	-	0,4	0,045	0,045	0,06-0,2		0,02

Tab. 7 Konkrétní chemické složení materiálu DC 01 - dle protokolu o tavně přiloženého dodavatelem

materiál	max C	max Si	max Mn	max P	max S	Ti	Cu	min Al
DC 01	0,04	0,024	0,23	0,012	0,007	0,001	0,04	0,04

Tab. 8 Mechanické vlastnosti materiálu S235 – dle normy ČSN EN 10025-2 [20]

Materiál	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tažnost A80 min [%]
DC 01	270-410	280	28

Tab. 9 Konkrétní mechanické vlastnosti materiálu DC 01 - dle protokolu o tavně přiloženého dodavatelem

Materiál	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tažnost A80 min [%]
DC 01	339	202	36,8

Charakteristika a využití

Jedná se o materiál se zaručenou svařitelností vhodný pro mírné i hluboké tažení. Využití nachází ve velmi různorodé výrobě. Využívá se na potrubí, vodovody, plynovody, nábytek, jízdní kola, motocykly apod.

S235 (11 375)

Tab. 10 Chemické složení materiálu S235 (11 375) dle normy ČSN EN 10025-2 [20]

Materiál	max C	max Si	max Mn	max P	max S	Ti	Cu	min Al
S235	0,2	-	1,2	0,05	0,05	0,06-0,2	0,25-0,5	0,02

Tab. 11 Konkrétní chemické složení materiálu S235 - dle protokolu o tavně přiloženého dodavatelem

Materiál	max C	max Si	max Mn	max P	max S	Ti	Cu	min Al
S235	0,1	0,02	0,81	0,016	0,016		0,07	0,037

Tab. 12 Mechanické vlastnosti materiálu S235 – dle normy ČSN EN 10025-2 [20]

Materiál	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tažnost A80 min [%]
S235	448	370	35,4

Tab. 13 Konkrétní mechanické vlastnosti materiálu S235 - dle protokolu o tavbě přiloženého dodavatelem

Materiál	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tažnost A80 min [%]
S235	448	370	35,4

Charakteristika a využití

Jedná se o nelegovanou konstrukční ocel pro strojní součásti a svařování konstrukce. Vhodná pro statické i dynamické namáhání. Svařitelnost je zaručena do tloušťky stěn 25 mm. Využívá se pro výrobu potrubí i spojovacích prvků potrubí rozvádějících olej, vzduch, páru a jiné plyny. Dalším možným využitím je stavba nosných trubkových konstrukcí.

S355 (11 523)

Tab. 14 Chemické složení materiálu S355 (11 523) dle normy ČSN EN 10025-2 [20]

Materiál	max C	max Si	max Mn	max P	max S	Ti	Cu	min Al
S355	0,2	0,55	1,6	0,05	0,045		0,25-0,5	

Tab. 15 Konkrétní chemické složení materiálu S355 - dle protokolu o tavbě přiloženého dodavatelem

Materiál	max C	max Si	max Mn	max P	max S	Ti	Cu	min Al
S355	0,2	0,55	1,6	0,025	0,025		0,55	0,02

Tab. 16 Mechanické vlastnosti materiálu S235 – dle normy ČSN EN 10025-2 [20]

Materiál	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tažnost A80 min [%]
S355	441-667	370	35,4

Tab. 17 Konkrétní mechanické vlastnosti materiálu S355 - dle protokolu o tavbě přiloženého dodavatelem

Materiál	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tažnost A80 min [%]
S355	470	355	19

Charakteristika a využití

Jedná se o materiál se zvýšenou odolností proti korozi vhodný pro výrobu plechů válcovaných za tepla. Používá se pro výrobu vagonů, sloupů osvětlení, kotlů, výměníků, kouřovodů průmyslových filtrů apod. Materiál je svařitelný metodami pod tavidlem a pod plynovou ochrannou atmosférou.

Raex 355

Tab. 18 Chemické složení materiálu Raex [16]

Materiál	max C	max Si	max Mn	max P	max S	min Al
Raex	0,12	0,03	1,2	0,02	0,02	0,015

Tab. 19 Konkrétní chemické složení materiálu Raex - dle protokolu o tavně přiloženého dodavatelem

Materiál	max C	max Si	max Mn	max P	max S	min Al
Raex	0,101	0,01	0,89	0,013	0,01	0,016

Tab. 20 Mechanické vlastnosti materiálu Raex [16]

Materiál	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tažnost A80 min [%]
Raex	430-530	355	24

Tab. 21 Konkrétní mechanické vlastnosti materiálu Raex - dle protokolu o tavně přiloženého dodavatelem

Materiál	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tažnost A80 min [%]
Raex	456	394	31

Charakteristika a využití

Jde o jemnozrnnou konstrukční ocel pro ploché výrobky válcované za tepla. Tato ocel je zvláště vhodná pro řezání laserem a všechny běžné svařovací metody. Používá se pro náročné konstrukce, jako jsou lžice rypadel, součásti důlních strojů, ostré pracovní hrany zemních strojů apod.

9.2 Použité stroje a přístroje [15], [19]

Laser Trumpf Trulaser 3530

Provedení experimentální části probíhalo ve spolupráci s firmou VN-Ú s.r.o. se sídlem ve Vsetíně. Výroba vzorků byla provedena na laseru Trulaser 3530 od německé firmy Trumpf.



Obr. 26 Laser Trumf Trulaser 3530 [19]

Tab. 22 Technická data laseru Trumf Trulaser 3530 [19]

Model	Trulaser 3530
Výkon [kW]	3,2
Pracovní pojezd X x Y x Z [mm]	3000x1500x115
Řezná rychlost [m / min]	0 - 16
Přesnost řezání [mm]	+ /- 0,1
Nosnost stolu [kg]	720
Laserový rezonátor	TruFlow 3200
Rozměry laserového centra DxŠxV [mm]	9300x4600x2000
Rozměry výměnného stolu DxŠxV [mm]	3800x2400x1000
Hmotnost stroje [kg]	11500
Výrobní číslo stroje	D0004 A5619
NC řídicí jednotka stroje	Sinumeric 840D
Vlnová délka [μm]	10,6

9.2 Drsnoměr Mahr Marsurf M300 [15]

Jedná se o přenosný dotykový drsnoměr. Výsledky měření jsou zobrazovány na digitálním displeji procesoru M300. V experimentální části byl tento drsnoměr použit pro měření drsnosti povrchu řezu připravených vzorků.



Obr. 27 Drsnoměr Mahr Marsurf M300 [15]

Tab. 23 Technická data měřicího snímače RD-18 [15]

Typ	Marf RD-18
Parametry měření	Ra, Rz, Rsm
Rozsah měření [μm]	Do 350 μm
Rozlišení [μm]	0,01
Sonda	Diamantový hrot, $r=2 \mu\text{m}$
Rychlost posuvu [mm/s]	0,5
Provozní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	+5 až +40
Hmotnost [kg]	0,3

Tab. 24 Technická data vyhodnocovacího zařízení Marf M300 [15]

Typ	Marf M300
Zobrazovací displej	LCD 320 x 240 bodů
Délka snímání [mm]	1,25; 4; 12,5
Hmotnost [kg]	1

9.3 Pracovní postupy

Postup výroby vzorků

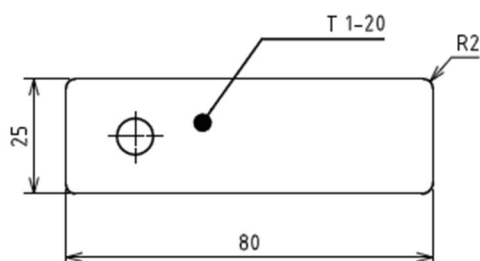
Cílem experimentu bylo mimo jiné zjistit jaký bude výsledek řezání na stroji v běžných v podmínkách výroby náročných na produktivitu. Stroj tedy nebyl na výrobu vzorků nijak zvláště připraven. Nebyla provedena žádná čištění nebo výměna optiky apod.. Z tohoto důvodu nebylo nutné seřizovat vystředění paprsku vůči trysce ani nijak dále zasahovat do mechanického nastavení.

Postup měření drsnosti

1. Měřicí zařízení vybalíme a provedeme vizuální kontrolu na vážná poškození
2. Spustíme přístroj a iniciujeme bluetooth spojení mezi snímacím a vyhodnocovacím zařízením
3. Hlásí-li zařízení na displeji připravené spojení, vybereme způsob měření. V našem případě Ra, Rz, Rsm
4. Vzorek upneme do svěráku
5. Snímací zařízení ustavíme do polohy, kde posuv hrotu běží paralelně s hranou materiálu v jedné třetině od horní hrany řezu. Stiskneme tlačítko pro spuštění měření
6. Po dokončení prvního měření zaznamenáme výsledky na papír nebo uložíme do paměti přístroje pro pozdější export nebo tisk.
7. Snímací zařízení ustavíme do polohy, kde posuv hrotu běží paralelně s hranou materiálu ve dvou třetinách od horní hrany řezu a stiskneme tlačítko pro spuštění měření
8. Tento postup opakujeme pro požadovaný počet měření (v našem případě pro zjednodušení provedeme 4 měření, dle ISO 9013 předepsáno 5 měření.)
9. Celý postup opakujeme pro všechny vzorky.
10. Po ukončení měření přístroj vypneme dle postupu kontextového menu a uložíme zpět do ochranného kufru.

9.4 Vyhodnocení vzorků

Pro náš experiment je důležité, zda nevznikly otřepy, pitting a zejména výsledná drsnost. Ostatní parametry nebudeme posuzovat.



Obr.28 Vzorek a nákres vzorku

Vzorek č. 1

Tab. 25 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál DC01, tloušťka 1 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
5	0,8	0	O ₂	1150	8,2	3,5

Tab. 26 Tabulka parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál DC01, tloušťka 1 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
5	0,8	-1	O ₂	1150	8,2	4

Tab. 27 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál DC01, tloušťka 1 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	4,32
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

Vzorek č. 2

Tab. 28 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál S355, tloušťka 2 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
5	0,8	0	O ₂	1050	5	4

Tab. 29 Tabulka parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál S355, tloušťka 2 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
5	0,8	0	O ₂	1170	5	4

Tab. 30 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál S355, tloušťka 2 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	7,22
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

U toho vzorku byla naměřena velmi vysoká drsnost, pravděpodobně způsobená velmi vysokým obsah křemíku v materiálu S355. Křemík má velmi negativní vliv na výsledky řezání laserem, neboť pojímá a akumuluje velké množství energie, která při tuhnutí, v místě kudy již prošel řezný paprsek, vytváří vruby.

Vzorek č. 3

Tab. 31 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál S235, tloušťka 3 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
5	0,8	0	O ₂	1000	3,6	2,5

Tab. 32 Tabulka parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál S235, tloušťka 3 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
5	0,8	-1	O ₂	1000	3,6	2,5

Tab. 33 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál S235, tloušťka 1 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	4,59
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

Vzorek č. 4

Tab. 34 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál S235, tloušťka 4mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
5	0,8	0	O ₂	1900	2,9	0,7

Tab. 35 Tabulka parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál S235, tloušťka 4mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
5	0,8	0,5	O ₂	1900	2,9	1

Tab. 36 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál S235, tloušťka 4 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	2,63
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

Vzorek č. 5

Tab. 37 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál S235, tloušťka 5 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1	0	O ₂	3200	3,1	0,8

Tab. 38 Tabulka parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál S235, tloušťka 5 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1	2	O ₂	3200	3,1	0,8

Tab. 39 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál S235, tloušťka 5 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	2,49
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

Vzorek č. 6

Tab. 40 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál S235, tloušťka 6 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1	0	O ₂	3200	2,8	0,8

Tab. 41 Tabulka parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál S235, tloušťka 6 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]

7,5	1	1,7	O ₂	3200	2,8	0,8
-----	---	-----	----------------	------	-----	-----

Tab. 42 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál S235, tloušťka 6 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	2,11
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

Vzorek č. 7

Tab. 43 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál S235, tloušťka 8 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1,4	0	O ₂	3200	2,2	0,6

Tab. 44 Tabulka parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál S235, tloušťka 8 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1,4	2	O ₂	3200	2,2	0,6

Tab. 45 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál S235, tloušťka 8 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	4,87
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

Vzorek č. 8

Tab. 46 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál S355, tloušťka 10 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1,4	0	O ₂	3200	1,8	0,5

Tab. 47 Tabulka parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál S355, tloušťka 10 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]

7,5	1,4	1,7	O ₂	3200	1,8	0,5
-----	-----	-----	----------------	------	-----	-----

Tab. 48 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál S355, tloušťka 10 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	11,77
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

U toho vzorku byla naměřena vůbec nejvyšší drsnost z celého experimentu. Vzhledem k tomu, že se jedná o materiál ze stejné dodávky jako materiál tloušťky 2 mm, na vině bude zřejmě opět velmi vysoký obsah křemíku v materiálu S355. Další možnou příčinou neuspokojivého výsledku řezání může být také nevhodně zvolená fokusace.

Vzorek č. 9

Tab. 49 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál S235, tloušťka 12 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1,4	0	O ₂	3200	1,5	0,5

Tab. 50 Tabulka parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál S235, tloušťka 12 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1,4	4	O ₂	3200	1,5	0,5

Tab. 51 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál S235, tloušťka 12 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	4,49
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

Vzorek č. 10

Tab. 52 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál S235, tloušťka 15 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1,4	0	O ₂	3200	1,1	0,5

Tab. 53 Tabulka parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál S235, tloušťka 15 mm						
Ohnisk. vzdál. Čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1,4	3	O ₂	3200	1,1	0,5

Tab. 54 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál S235, tloušťka 15 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	6,17
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

Vzorek č. 11

Tab. 55 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál S235, tloušťka 20 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1,4	0	O ₂	3200	0,85	0,6

Tab. 56 Tabulka parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál S235, tloušťka 20 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1,7	3,7	O ₂	3200	0,9	0,6

Tab. 57 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál S235, tloušťka 20 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	7,16
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

Vzorek č. 12

Tab. 58 Tabulka doporučených parametrů pro řezání dané tloušťky měkké oceli [19]

Řezaný materiál RAEX, tloušťka 20 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1,7	0	O ₂	3200	0,85	0,6

Tab. 59 Tabulka č 5.1.2 parametrů použitých pro řezání daného vzorku

Řezaný materiál RAEX, tloušťka 20 mm						
Ohnisk. vzdál. čočky [palce]	Průměr řezné trysky [mm]	Fokusace [mm]	Asistenční plyn	Výkon laseru [W]	Řezná rychlost [m/min]	Tlak asistenčního plynu [bar]
7,5	1,7	3,7	O ₂	3200	0,9	0,6

Tab. 60 Tabulka hodnocení řezu

Řezaný materiál RAEX, tloušťka 20 mm	
Výskyt otřepů	Ne
Výskyt pittingu	Ne
Průměrná drsnost Rz [μm]	5,53
Třída drsnosti řezu dle ISO 9013	1

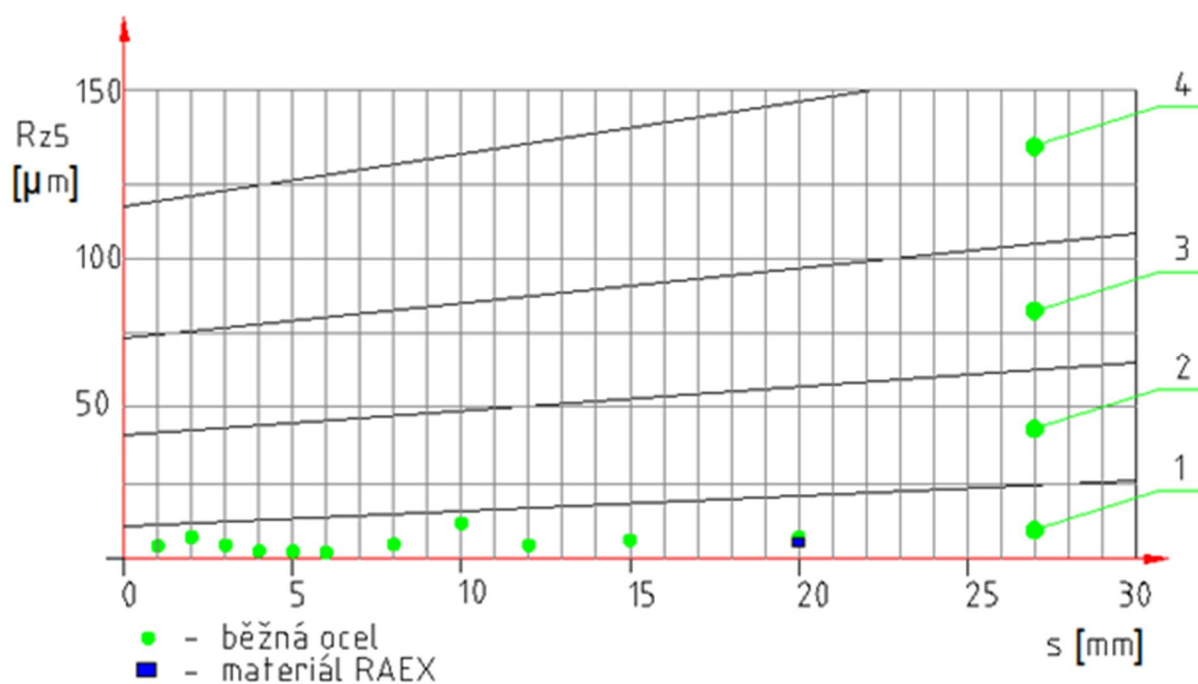
Materiál Raex je často nazýván jako laserový plech. V tomto případě se projeví jeho příznivé vlastnosti a bylo dosaženo výrazně nižší drsnosti povrchu řezu než u předchozího vzorku z běžného materiálu o stejné tloušťce.

Tab. 61 Souhrn měření všech vzorků

Tloušťka materiálu	Druh materiálu	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	Průměrná hodnota drsnosti Rz	Stř. kvadr. chyba
1	DC01	4,546	3,849	4,597	4,285	4,32	0,12
2	S355	7,504	5,895	6,580	8,935	7,23	1,73
3	S235	2,788	1,825	8,144	5,622	4,59	8,20
4	S235	3,187	2,805	2,107	2,427	2,63	0,22
5	S235	2,184	2,156	2,700	2,924	2,49	0,15
6	S235	2,683	1,860	1,898	2,001	2,11	0,15
8	S235	5,197	2,949	5,044	6,278	4,87	1,94
10	S355	13,230	12,240	10,820	10,803	11,77	1,40
12	S235	5,265	3,987	4,818	3,892	4,49	0,44
15	S235	5,770	6,067	6,195	6,644	6,17	0,13
20	S235	5,940	7,274	8,240	7,172	7,16	0,89
20	Raex 355	4,652	7,028	6,438	4,003	5,53	2,06

Tab. 62 Souhrn výsledných drsností a řezných parametrů pro jednotlivé tloušťky

Tloušťka materiálu	Druh materiálu	Řezná rychlost [m/min]	Výkon laseru [W]	Tlak asist. plynu [bar]	Fokusace [mm]	Průměrná hodnota drsnosti Rz	Stř. kvadr. chyba
1	DC01	8,2	1150	4	-1	4,32	0,12
2	S355	5	1050	4	0	7,23	1,73
3	S235	3,6	1000	2,5	-1	4,59	8,20
4	S235	2,9	1900	1	0,5	2,63	0,22
5	S235	3,1	3200	0,8	2	2,49	0,15
6	S235	2,8	3200	0,8	1,7	2,11	0,15
8	S235	2,2	3200	0,6	2	4,87	1,94
10	S355	1,8	3200	0,5	1,7	11,77	1,40
12	S235	1,5	3200	0,5	4	4,49	0,44
15	S235	1,1	3200	0,5	3	6,17	0,13
20	S235	0,9	3200	0,6	3,7	7,16	0,89
20	Raex355	0,9	3200	0,6	3,7	5,53	2,06



Obr. 29 Diagram vyhodnocení drsnosti ISO 9013 [18]

10. ZÁVĚR:

Řezání laserem je proces velmi citlivý na mnoho parametrů. V této bakalářské práci byly zkoumány závislosti výsledné kvality řezu laserem na nastavení stroje a vlastnostech obrobku.

Experiment byl proveden ve spolupráci s firmou VN-Ú s.r.o., která poskytla materiál a veškerý strojový čas. Cílem experimentu je vyhodnotit kvalitu drsnosti povrchu řezu vzorků o tloušťce 1-20 mm zhotovených oxidačním řezáním. Kvalita povrchu je hodnocena podle ISO 9013. Parametry řezného procesu byly na stroji nastaveny podle hodnot doporučených výrobcem stroje s korekcí dle zkušeností obslužných pracovníků firmy VN-Ú s.r.o. Naším cílem bylo posoudit kvalitu řezu v běžné praxi, tedy bez zvláštního odladování pro každou výrobní sérii. Tento postup je ve výrobním programu firmy VN-Ú s.r.o. běžný, jelikož většina zpracovaného materiálu pokračuje k dalším operacím jako ohýbání, svařování apod., kde je i snižená kvalita řezu naprosto dostačující.

Výsledky měření drsnosti vzorků zobrazené v diagramu ukazují, že veškeré hodnoty jsou v rozmezí 1. třídy kvality. Důsledkem reakce roztaveného kovu s kyslíkem vznikly na řezné hraně stopy okuje. Tento výsledek lze považovat za běžnou kvalitu řezu. Nejdůležitější je však samozřejmě konkrétní požadavek zákazníka předepsaný na výkrese, případně technologické požadavky dalšího zpracování obrobku. Pokud by zákazník požadoval vyšší kvalitu řezu, zvolili bychom konzervativnější nastavení stroje oproti parametrům doporučených výrobcem. Dalšího zvýšení kvality řezu bychom mohli dosáhnout detailním odladěním parametrů řezného procesu na testovací sérii výpalků, nejlépe z materiálu ze stejné dodávky, určené pro celý objem výroby, abychom tak podchytily specifika konkrétního chemického složení apod. Pokud by ani pak nebyla kvalita řezu dostačující, nabízí se změna technologie jako například tavné řezání dusíkem. Všechny tyto změny však mají za následek navýšení ceny. V případě, že bychom usilovali o minimální náklady na řezání, je možné použít technologii řezání stlačeným vzduchem. Tato metoda však stále prochází vývojem, její specifika nejsou dosud zcela popsána a je použitelná pouze pro materiály tloušťky maximálně 4 mm. Další nevýhodou je také nutnost přídatného zařízení pro úpravu stlačeného vzduchu (sušení apod.).

Ve výsledcích měření se vyskytly vysoké hodnoty drsnosti u materiálu tloušťky 2 a 10 mm. Z tohoto důvodu byly vzorky dále zkoumány. Bylo zjištěno, že tento materiál obsahuje velké množství křemíku, které hraničí s maximálními povolenými hodnotami pro danou třídu. Křemík je obecně nejškodlivější chemický prvek co se laserového dělení materiálu týče. Toto specifické chemické složení materiálu bylo tedy hlavním důvodem neobvyklých výsledků.

Pro zajímavost byl do měření zařazen i vzorek z materiálu RAEX. Ten je často označován za „laserový plech“ díky svým příznivým vlastnostem pro řezání laserem. Raex má oproti běžnému materiálu snížený obsah křemíku a tak je při jeho řezání dosahováno výrazně lepších výsledků než u běžných materiálů. Tento fakt je názorně vidět v diagramu vyhodnocení drsnosti ISO 9013.

Potvrdili se tak předpoklady, že i přes negativní faktory, jako jsou opotřebení stroje a upřednostnění produktivity výroby před kvalitou, jsme při dělení kovových materiálů laserem schopni dosahovat výsledků splňující světové normy a náročné požadavky zákazníka. Můžeme tedy říci, že tato metoda je zcela spolehlivá a to i přes výskyt dvou vzorků o extrémní drsnosti. Dlouholeté zkušenosti firmy VN-Ú s.r.o. vypovídají, že tyto problémové případy nikdy nepřesáhnou jedno procento ročního objemu výroby. Vývoj této technologie však stále pokračuje směrem k vyšší efektivnosti. Postupem času bude s největší pravděpodobností nutné normu ISO 9013 změnit, neboť její kritéria nebudou dostatečně přísná.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.: *Laserové technologie*, 1. vyd., Bratislava, Vydavatelství STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
2. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-857-7181-0.
3. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000, 213 s. ISBN 80-857-7172-1.
4. NOVÁK, Miroslav. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu: Základní přehled průmyslových laserů. *Hlavní typy laserů používaných v průmyslu: Základní přehled průmyslových laserů* [online]. 2011, č. 4 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.lao.cz/laoinfo/serial2011/hlavni_prumyslove_lasery.php.
5. NOVÁK, Miroslav. Základní princip laseru a jejich dělení. *Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. 2011, č. 1 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://www.lao.cz/laoinfo/serial2011/princip_laser_a_deleni.php
6. KOŘÁN, Pavel. Laserové řezání (laser cutting): Úvod - historický vývoj laserového řezání. *Laserové řezání (laser cutting): Úvod - historický vývoj laserového řezání* [online]. 2011, č. 3 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.lao.cz/laoinfo/serial2011/laserove_rezani.php
7. LUKÁŠEK, Jaromír. Laserové dělení materiálu. *Laserové dělení materiálu* [online]. 2007 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>
8. TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH + CO. KG. *Laser processing: CO2 laser*. Ditzingen, 2007.
9. Focusing Laser Light. SCIENCE PHOTO LIBRARY LTD. *Science photo library* [online]. London, 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.sciencephoto.com/media/92604/enlarge>
10. BUCHFINK, G., TRUMPF. *Fascination of sheet metal*. 1st edition. Kammüller, N. (editor), Coleman, R.M. (translate), Germany: 2006. 20 s. ISBN 3-8343-3071-0.
11. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
12. KOTLANOVÁ, Anna. KEV/TD - Technická dokumentace. In: *KEV/TD - Technická dokumentace* [online]. [2009] [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.unium.cz/materialy/zcu/fel/materialy-m14208-p1.html>
13. STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA V TEPLICÍCH. *MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU: Podklady pro školní úlohy*. Teplice, 2008. Dostupné z: http://sps.watzke.cz/dl/KOM/ULOHA_3.1.4_MERENI_DRSNOSTI_POVRCHU.pdf
14. LEINVEBER, Jan. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 2. dopl. vyd. Úvaly: ALBRA, 2005, 907 s. ISBN 80-736-1011-6.

15. MAHR GMBH. *Mahr-Metrology-Catalog*. Göttingen, 2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.mahr.cz/images/OnlineKataloge/Mahr-Metrology-Catalog--CZ--2011/blaetterkatalog/index.html>
16. OCELI ODOLNÉ PROTI OPOTŘEBENÍ: Ocel Raex odolná proti opotřebení. RAUTARUUKKI CORPORATION. *Ruukki* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.ruukki.cz/Produkty-a-reseni/Hutni-materialy/Oceli-valcovane-za-tepla/Oceli-odolne-proti-opotrebeni/Ocel-Raex-odolna-proti-opotrebeni>
17. Materiálové normy. FERONA, a.s. *Ferona, a.s.* [online]. 2004 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php
18. ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. Chotěboř: Český normalizační institut, 2003.
19. TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH + CO. KG. *Technischen Dokumentation: Datensammlung*. Ditzingen, 2006.
20. ČSN EN 10025-2. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Chotěboř: Český normalizační institut, 2005.