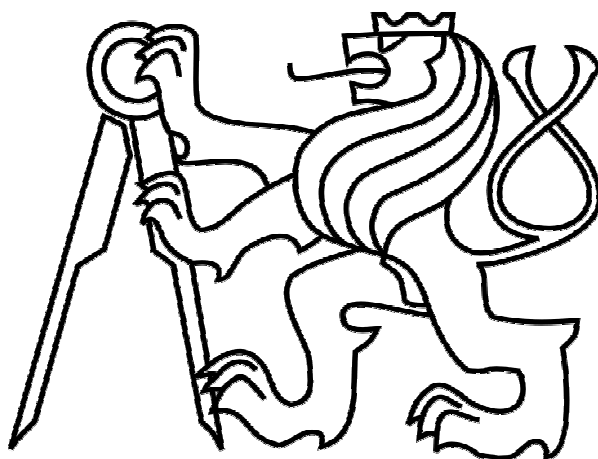


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Vliv technologických parametrů řezání vláknovým laserem na kvalitu řezu

2018

Jakub Petrus

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petrus** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **437264**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv technologických parametrů řezání vláknovým laserem na kvalitu řezu

Název bakalářské práce anglicky:

Technological Parameters of Fibre Lasers: Effects on Cutting and Cut Quality

Pokyny pro vypracování:

Osnova práce: 1) Rešerše - historie laseru, druhy laserů, základní přehled laserových technologií; 2) Technologie vláknového laseru - možnosti a druhy řezání vláknovým laserem, sestavení laserové technologie; 3) Vytvoření sady vzorků - pro každý materiál vybranými výkony a asistenčními plyny, materiál: ocel 11 373, ocel 17 240, hliníková slitina vybrané tloušťky; 4) Hodnocení vzorků - Vizuální kontrola vzorků jako velikost otřepu, úkosu, natavení nebo oxidace řezné hrany; 5) Popis použitých strojů a vybavení; 6) Zhodnocení- Porovnání řezaných vzorků vybranými výkony a asistenčními plyny; Rozsah textové části: 40 -60 stran

Seznam doporučené literatury:

- [1] Charles L. C.: Laser Cutting Guide for Manufacturing, Society of Manufacturing Engineers, 2004 -, ISBN 0872636860, Počet stran: 447
- [2] Liang D., Bryce S.: Fiber Lasers: Basics, Technology, and Applications, 2016 by CRC Pres, ISBN 9781498725545 - CAT# K25782, 324 Pages
- [3] Buchfink G.: The Laser As a Tool Vogel Buchverlag Wurzburg (2007) ISBN-13: 978-3834330727

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Brajer, ústav výrobních strojů a zařízení FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2018**


Ing. Jan Brajer
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Petr Kolář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

30.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 30.6.2018

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Janu Brajerovi za vedení této bakalářské práce, cenné rady a věcné připomínky k jejímu vypracování. Dále bych chtěl poděkovat Ondřeji Miřátskému z firmy Vanad 2000 a.s. za vstřícnost, ochotu a možnost uskutečnění experimentu, Ing. Petru Maškovi z Výzkumného centra pro strojírenskou výrobní techniku a technologii a Ing. Janu Urbanovi z Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie za pomoc při měření jakosti povrchu. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům za jejich významnou podporu během studia.

Anotace

Autor:	Jakub Petrus
Název BP:	Vliv technologických parametrů řezání vláknovým laserem na kvalitu řezu
Rozsah práce:	64 str., 50 obr., 19 tab.
Akademický rok vyhotovení:	2017/2018
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 - Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jan Brajer
Konzultant:	Ondřej Miřátský
Zadavatel:	Vanad 2000 a.s.
Využití:	Zjištění závislosti řezné rychlosti na kvalitu řezu vláknovým laserem pro optimalizace řezného procesu.
Klíčová slova:	Laser, laserové technologie, laserové řezání
Anotace:	Práce se zabývá dělením materiálu vláknovým laserem a následným vyhodnocením kvality řezu. Teoretická část se zabývá lasery obecně, laserovými technologiemi a metodami nekonvenčního dělení materiálu. V experimentální části je navržen experiment spočívající ve vyřezání sady vzorků u kterých je hodnocena kvalita řezu v závislosti na řezné rychlosti.

Annotation

Author:	Jakub Petrus
Title of bachelor dissertation:	Technological Parameters of Fibre Lasers: Effects on Cutting and Cut Quality
Extent:	64p., 50 fig., 19 tab.
Academic year:	2017/2018
Univerzity:	CTU in Prague - Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 - The Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Jan Brajer
Consultant:	Ondřej Miřátský
Submitter of the Theme:	Vanad 2000 a.s.
Application	Determination of cutting rate dependance on fiber laser cutting quality for optimized cutting process
Key words:	Laser, laser technology, laser cutting
Annotation:	This thesis deals with the laser material cutting by fiber laser and with subsequent evaluation of the cut quality. A teoretical part deal with laser in general, laser technologies and unconventional material separation methods. In experimental part is designed an experiment consisting to produce a set of samples in which the cutting quality is evaluated in relation to the cutting speed.

Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Anotace	5
Annotation	6
Obsah	7
Úvod.....	9
1. Nekonvenční metody dělení materiálů	10
1.1. Řezání plasmou	10
1.2. Řezání plamenem	11
1.3. Řezání vodním paprskem (WJ).....	12
1.4. Elektroerozivní řezání (EDM).....	13
1.5. Porovnání metod nekonvenčního dělení materiálů	13
2. Lasery a laserové technologie	15
2.1. Fyzikální princip laseru	15
2.2. Konstrukce laseru	16
2.2.1. Aktivní prostředí	17
2.2.2. Rezonátor	17
2.2.3. Zdroj záření.....	17
2.3. Rozdělení laserů	17
2.3.1. Dělení dle aktivního prostředí	18
2.4. Průmyslové laserové technologie.....	18
2.4.1. Gravírování a značení	18
2.4.2. Tepelné zpracování	19
2.4.3. Mikroobrábění	20
2.4.4. Leštění a čištění	21
2.4.5. 3D tisk kovů.....	21
2.4.6. Svařování	21
2.4.7. Laserové navařování.....	22
2.4.8. Řezání	22
2.5. Technologie laserového řezání.....	22
2.5.1. Tavné laserové řezání	23
2.5.2. Sublimační řezání	24
2.5.3. Oxidační řezání	24
2.5.4. Výhody a nevýhody laserového řezání.....	25
2.6. Lasery používané pro řezání	25
2.6.1. Nd:YAG laser	26
2.6.2. Diskový laser	27
2.6.3. Vláknový laser	27
2.6.4. CO ₂ laser	28
3. Experimentální část.....	30
3.1. Návrh experimentu.....	30

3.2.	Použitá zařízení	33
3.2.1.	Software WRYKRYS	33
3.2.2.	Vanad KOMPAKT Laser	34
3.2.3.	Digitální mikroskopová USB kamera.....	35
3.2.4.	Profiloměr MarSurf XCR 20	36
3.3.	Použité materiály.....	37
3.3.1.	Konstrukční ocel S235JR (ČSN 11 375).....	37
3.3.2.	Nerezová ocel X5CrNi18-10 (ČSN 17 240).....	38
3.3.3.	Hliník EN AW-1050A H24 (ČSN 42 4005).....	38
3.4.	Použité plyny.....	39
3.4.1.	Kyslík 3.5.....	39
3.4.2.	Dusík 5.0.....	39
3.4.3.	Vzduch.....	39
3.5.	Naměřená data.....	39
4.	Vyhodnocení.....	40
4.1.	Hodnocení kvality řezu oceli S235JR řezané kyslíkem.....	40
4.2.	Hodnocení kvality řezu oceli S235JR řezané vzduchem	41
4.3.	Hodnocení kvality řezu oceli S235JR řezané dusíkem	42
4.4.	Hodnocení kvality řezu oceli X5CrNi18-10 řezané vzduchem	44
4.5.	Hodnocení kvality řezu oceli X5CrNi18-10 řezané dusíkem	45
4.6.	Hodnocení kvality řezu hliníku EN AW-1050A H24 řezaného vzduchem.....	46
4.7.	Hodnocení kvality řezu hliníku EN AW-1050A H24 řezaného dusíkem.....	47
5.	Závěr	49
	Seznamy.....	54

Úvod

V 60. letech minulého století došlo k vývoji prvního prototypu laseru. Od té doby lasery zažily neuvěřitelný rozvoj a dnes se s nimi můžeme setkat v mnoha odvětvích, jako například v medicíně, chemii, biologii, výpočetní technice a mnoha dalších. V neposlední řadě se využívá ve strojírenské výrobě a to především ke svařování, gravírování, tepelnému zpracování a řezání. [1]

Vzhledem k tomu, že se stále zvyšují nároky na výrobu, roste produkce oceli a zároveň produkce strojů, které ji zpracovávají, je nutné neustále vyvíjet nové technologie a inovovat ty dosavadní. V oblasti dělení materiálu dochází k využívání nekonvenčních metod, které dokážou pružně reagovat na změnu výroby a mnohdy jsou jedinou možností, jak daný výrobek vyhotovit. Na takové stroje jsou kladeny stále větší a větší požadavky na produktivitu a kvalitu opracování materiálu, což vede k jejich velkému rozvoji. Z toho důvodu jsou, v dnešní době nejrozšířenější, CO₂ lasery pomalu nahrazovány lasery vláknovými. Ty totiž dosahují větší účinnosti a životnosti, což samozřejmě znamená úsporu nákladů při jejich provozu. Vývoj vláknových laserů probíhá od počátku 80. let minulého století až do současnosti. [2] [3]

Pro co nejefektivnější řezání je velmi důležité zjistit technologické parametry, které jsou pro každý materiál, asistenční plyn a samotný laserový zdroj jiné. Každý uživatel má na kvalitu řezu také jiné požadavky. V některém případě je důležitý co nejkvalitnější povrch řezné hrany, v jiném stojí na prvním místě absence jakýchkoliv ořepů. Z toho důvodu vzniká tato bakalářská práce, jenž spočívá v provedení experimentu, zabývající se vlivem řezné rychlosti na kvalitu řezu. Práce poslouží firmě Vanad 2000 a.s. jako návod pro optimalizaci řezného procesu, při přípravě stroje před předáním zákazníkovi.

Vanad 2000 a.s. je firma sídlící v Golčově Jeníkově zabývající se výrobou strojů pro tvarové řezání materiálů autogenem, plazmou a vláknovým laserem. Společnost byla založena v roce 1994 za účelem rekonstrukce starších strojů a vývoje vlastního stroje a řídicího systému. V současnosti firma nabízí celkem 9 strojů vlastní konstrukce, z toho 7 strojů pro autogenní nebo plazmové řezání (Bluester, Proxima, Suprema, Kompakt a Kompakt Light, Arena, Mira, Miron) a 2 stroje pro technologii řezání vláknovým laserem (Kompakt Laser, Miron Laser). [56]

1. Nekonenční metody dělení materiálů

Mezi nekonvenční metody obrábění patří řezání laserem, plasmou, plamenem, vodním paprskem a elektroerozivní drátové řezání. Každá z uvedených technologií má své výhody a nevýhody a tudíž i vhodnou oblast použití. [28] [35]

1.1. Řezání plasmou

Jedná se o metodu termického dělení, kdy se materiál pomocí oblouku vysokoteplotního ionizovaného plynu (17000 °C až 33000°C) roztaví a vyfoukne z řezné mezery. Pro tuto metodu jsou typické vysoké rychlosti, ale také úkos řezné hrany. [28] [37]



Obrázek 1-Řez plasmou[28]

Výhody:

- Nízká pořizovací cena
- Není nutný předehřev materiálu
- Schopnost řezat velké tloušťky materiálů

Nevýhody:

- Zkosení řezné hrany
- Vznik prachu a UV záření; produkuje velký hluk
- Vzniká otřep
- Nejhorší přesnost z uvedených metod
- Řeže pouze elektricky vodivé materiály

1.2. Řezání plamenem

Ze všech uvedených metod je řezání plamenem nejstarší. Především se využívá kyslíko-acetylenový plamen, ale je možné použít i kyslík ve směsi s jiným plynem jako etylen, propan nebo vodík. Řezaný materiál se nejprve musí nahřát, poté dojde k propálení a následně samotnému procesu řezání. Pro řezání plamenem musí materiál splňovat tři určité podmínky:

1. Při hoření kovu se musí uvolňovat dostatečné množství tepla, aby byly kryty ztráty tepla a proces řezání mohl nerušeně pokračovat.
2. Zápalná teplota řezaného kovu musí být menší nebo rovna teplotě tavení řezaného kovu.
3. Tavicí teplota oxidů musí být menší nebo rovna tavicí teplotě řezaného kovu [37] [35]



Obrázek 2-Řez plamenem [17]

Výhody:

- Nízká pořizovací cena
- Nízké provozní náklady
- Velké tloušťky materiálů

Nevýhody:

- Řeže pouze úzkou skupinu materiálů
- Velká tepelně ovlivněná oblast (HAZ)

1.3. Řezání vodním paprskem (WJ)

Tato technologie využívá abrazivní účinky vysokoenergetického kapalinového paprsku. Vodní paprsek dosahuje rychlosti až čtyřnásobně vyšší než je rychlost zvuku. Existují dva typy technologie řezání vodním paprskem, a to řezání čistou vodou anebo řezání vodním paprskem s abrazivem. [28] [36] [37]



Obrázek 3-Řez WJ [28]

Výhody:

- Řeže jakýkoliv materiál
- Studený řez - nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu
- Velmi kvalitní povrch řezné hrany
- Řez tenkých i velmi tlustých materiálů (až 600 mm)

Nevýhody:

- Malé řezné rychlosti
- Kontakt s vodou - dochází ke korozi
- Delší vysoušení nasákavých materiálů

1.4. Elektroerozivní řezání (EDM)

Proces, při kterém je materiál z řezné spáry odstraněn natavením pomocí elektrického výboje a následně vypláchnut dielektrickým roztokem. Elektroda je zde tvořena drátem, který se neustále odvíjí. Díky dosažitelnosti vysoké přesnosti a kvalitě povrchu se tato metoda nejčastěji využívá při výrobě lisovacích nástrojů. [28] [38]



Obrázek 4-Řez EDM [28]

Výhody:

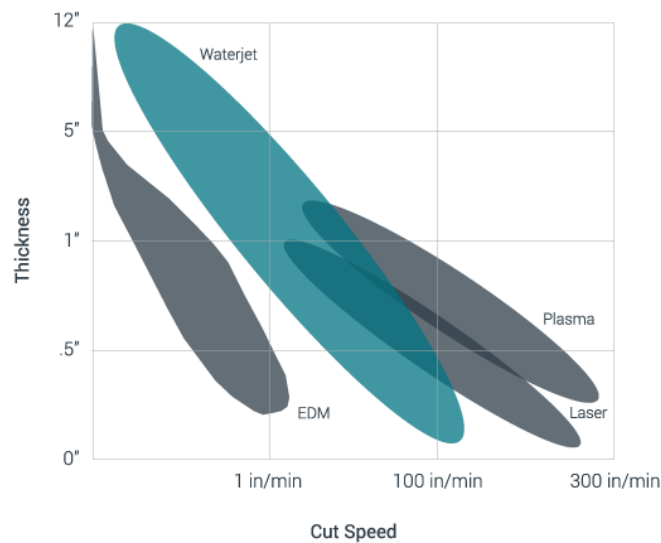
- Vysoká přesnost obrábění
- Možnost řezat těžkoobrobitelné materiály

Nevýhody:

- Možnost obrábět pouze elektricky vodivé materiály
- Velmi nízké řezné rychlosti
- Malé rozměry obrobků
- Energetická náročnost

1.5. Porovnání metod nekonvenčního dělení materiálů

Na obrázku 5 je uveden graf závislosti řezné rychlosti na tloušťce řezaného materiálu. Není zde vyobrazena metoda řezání plamenem. Z grafu je patrné, že nejuniverzálnější metoda pro dělení materiálů je vodní paprsek. Vodním paprskem lze dělit mnohem silnější materiály než pomocí laseru, kdyžto laserové a plasmové řezání dosahuje větších řezných rychlostí než vodní paprsek.



Obrázek 5-Rozsah řezných rychlostí [28]

V tabulce 1 je uvedeno porovnání metod nekonvenčního dělení materiálů podle určitých kritérií. Výběr vhodné technologie záleží především na typu a tloušťce řezaného materiálu a na požadované jakosti řezu.

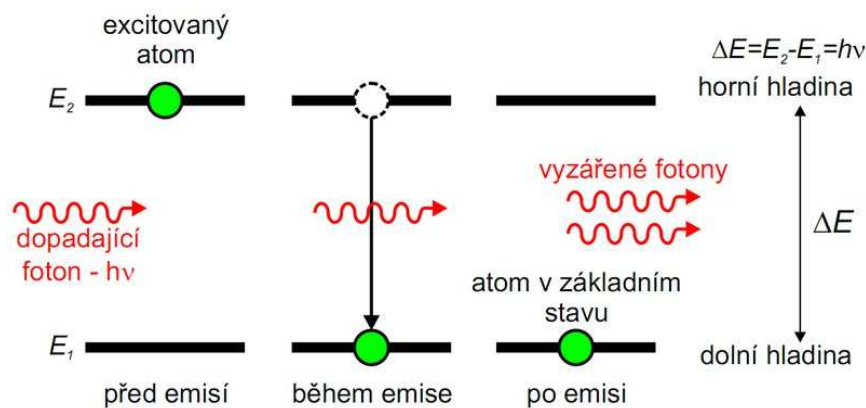
Tabulka 1-Porovnání uvedených metod řezání

	Řezání laserem	Řezání plasmou	Řezání plamenem	Řezání vodním paprskem	Řezání EDM
Následné opracování	Někdy ano	Obvykle ano	Obvykle ano	Obvykle ne	Obvykle ne
Materiál	Především ocel, ale i řada dalších	Pouze vodivé	Oceli uhlíkové a nízkolegované	Veškerý materiál	Pouze vodivé
Tloušťka	Do 30mm	Do 120 mm	Do 300 mm	Až do 600 mm	Až 400 mm
Přesnost	Do 0,1 mm	Do 0,5-1 mm	Do 0,5-1 mm	Do 0,1 mm	Do 0,01 mm
Rychlost	Velmi velká	Velká u slabých materiálů	Menší než u plasmy	Větší než u EDM, menší než u ostatních	Velmi malá
HAZ	Malá	Větší	Největší	Žádná	Minimální
Nastavení	Různé plyny a parametry pro různé úlohy	Různé plyny a parametry pro různé úlohy	Různé parametry pro různé úlohy	Zejména nastavení řezné rychlosti	Různé typy vodičů pro různé úlohy

2. Lasery a laserové technologie

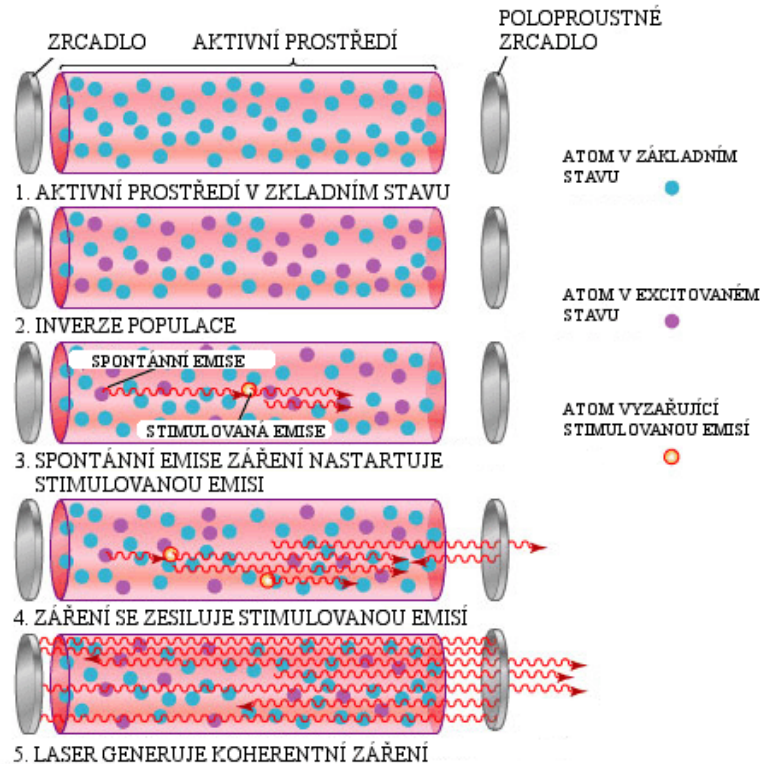
2.1. Fyzikální princip laseru

Laser, (z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation tj. zesilování světla stimulovanou emisí záření), je zdroj vysoce koherentního elektromagnetického záření, které vzniká stimulovanou emisí záření aktivních částic buzených vnějším zdrojem energie. Princip laseru využívá zákony kvantové fyziky a termodynamiky. [4] [5]



Obrázek 6-Stimulovaná emise [29]

Laserový paprsek vzniká přechodem atomů mezi jednotlivými energetickými hladinami. Elektrony jsou nejprve excitovány na horní energetickou hladinu, ze které za velmi krátkou dobu (v řádech miliardtin sekundy) přeskočí na hladinu pracovní-metastabilní hladinu. Následně dojde k relaxaci z vyššího do nižšího energetického stavu a k vyzáření kvanta energie ve formě fotonů. Tento přechod se děje spontánně, prostředí má snahu být v nejnižším energetickém stavu, tedy ve stavu termodynamické rovnováhy. Pomocí buzení tuto rovnováhu porušíme a převedeme aktivní prostředí do excitovaného stavu, kde je většina atomů ve stavu s vyšší energií. Tomuto stavu, kdy je na metastabilní hladině více elektronů než na základní, se říká inverze populace. [6] [7]

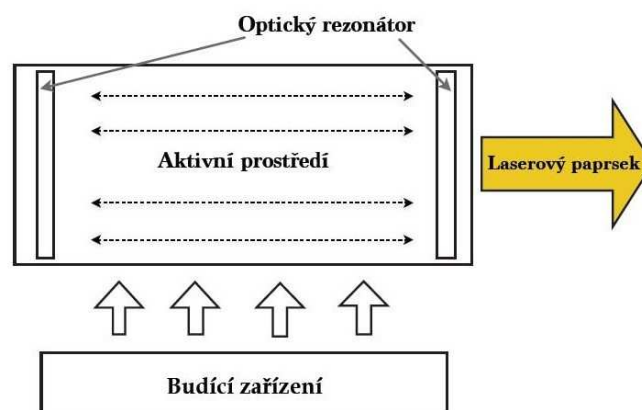


Obrázek 7-Vznik laserového svazku v rezonátoru [29]

Následně se energie dodaná aktivnímu prostředí přeměňuje na proud fotonů, který můžeme nazvat jako laserový svazek. V podstatě se jedná o lavinovitý efekt. [6]

2.2. Konstrukce laseru

Laser se skládá ze tří hlavních částí. Těmi jsou aktivní prostředí, rezonátor, zdroj záření. [8]



Obrázek 8-Konstrukce laseru [4]

2.2.1. Aktivní prostředí

Aktivní prostředí je látka, která musí obsahovat oddělené kvantové energetické hladiny elektronů. Musí se skládat z prvků, co obsahují metastabilní hladinu. Je to nejdůležitější část laserového zařízení, neboť v něm vzniká stimulovaná emise. [8]

2.2.2. Rezonátor

Laserové zařízení tento prvek využívá k zesilování světla. Je to optická dutina vymezená dvěma rovnoběžnými, na osu kolmými zrcadly. Jedno je nepropustné, načež druhé polopropustné. Nepropustné zrcadlo je většinou dielektrické nebo je vyrobeno z leštěného kovu (měď, zlato). Propustné zrcadlo propouští fotony až při větší intenzitě záření, jinak zadržuje fotony v aktivním prostředí. Zrcadla bývají většinou rovinná, ale mohou být i zakřivená (konvexní, konkávní).

Některé lasery rezonátor nepotřebují, pracují tzv. "superradiačně", což znamená, že dokážou získat energii jedním průchodem aktivním prostředím. Patří mezi ně například měděný nebo dusíkový laser. [8]

2.2.3. Zdroj záření

Tento zdroj dodává elektronům v aktivním prostředí energii, aby se mohli přesouvat mezi energetickými hladinami. Zdrojem může být elektrický proud, výbojka či chemická reakce. [8]

2.3. Rozdělení laserů

Lasery můžeme dělit dle několika kritérií:

- Aktivní prostředí
 - Pevnolátkové
 - Polovodičové
 - Plynové
 - Kapalinové
- Vlnová délka
 - Infračervené
 - V oblasti viditelného pásma
 - Ultrafialové
 - Rentgenové
- Časový režim
 - Kontinuální
 - Pulzní
 - Kvazikontinuální

Dále je možné dělení dle počtu energetických hladin, nebo způsobu čerpání energie. [9]

2.3.1. Dělení dle aktivního prostředí

Pevnolátkové

Jejich aktivní prostředí je tvořeno krystalickými nebo amorfními izolanty s příměsí vhodných iontů. Může být ve formě tyčinky z krystalu, tenkého disku anebo vlákna. Pevnolátkové lasery umí pracovat v několika režimech a za různých pracovních podmínek. Vycházející záření je o vlnové délce infračerveného až viditelného světla. Jejich výhodou je stabilita a nenáročná údržba. Nejznámějším zástupcem je laser rubínový, jehož aktivní prostředí je tvořeno krystalem syntetického rubínu. Dalším zástupcem je neodymový laser (Nd:YAG). Ten se hojně využívá v mnoha odvětvích, převážně v medicíně a strojírenství. Vyzařuje infračervené světlo o vlnové délce 1064 nm. [10] [11]

Polovodičové

V současné době se jedná o nejrozšířenější skupinu laserů. Jejich základem je dioda o velmi malých rozměrech, která dosahuje účinnosti až 50 %. Jejich nevýhodou je však větší divergence paprsku než u ostatních typů. Jejich výkon se dá snadno měnit změnou elektrického proudu, tudíž se hojně využívají v telekomunikacích, ve výpočetní a spotřební elektronice. [10] [11]

Plynové

V tomto případě aktivním prostředím mohou být atomy, ionty nebo molekuly. Generují ultrafialové infračervené záření, umí pracovat v kontinuálním nebo pulzním režimu. Našly velké uplatnění v technice díky schopnosti regulace objemu plynu přítokem a tudíž obnovovat aktivní prostředí. Nejznámějším zástupcem je helium-neonový laser generující jak červené světlo s vlnovou délkou 632,8 nm, tak zároveň infračervené záření. Aktivním plynem je tu neon. Ve strojírenství se nejvíce využívá CO₂ laser. Jeho záření je o vlnové délce 10,6 μm na úrovni infračerveného záření. [10] [11]

Kapalinové

Tyto lasery se používají například ve spektroskopii. Tvoří je roztoky organických barviv. Zkombinováním několika druhů barviv a nelineární optiky jsme schopni dosáhnout vlnových délek od 300 nm až do 1500 nm. Jejich nevýhodou je krátká životnost aktivního prostředí, které se vlivem tepla rozkládá. [10] [11]

2.4. Průmyslové laserové technologie

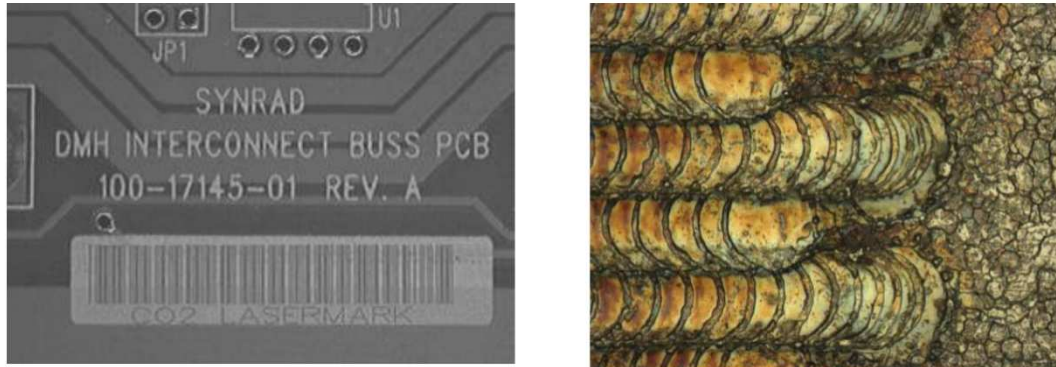
Laser se využívá v mnoha průmyslových aplikacích, avšak ne každý laser je vhodný pro každou technologii.

2.4.1. Gravírování a značení

Značení (popisování) vzniká tepelným působením laserového svazku, který odebere nebo modifikuje vrstvu na povrchu materiálu. Gravírování funguje na stejném

principu jako značení, ale je prováděno do větší hloubky. Gravírovat a značit můžeme široké spektrum materiálů jako nástrojovou ocel, nerezovou ocel, mosaz, měď, zlato, hliník, titan. Dále pak různé druhy plastů, dřevo a kovy s povrchovou úpravou (např. eloxovaný hliník). Používá se k popisování výrobků nebo jako dekorace. [25] [12]

Využívají se zde převážně lasery pracující v pulzním režimu, a to CO₂ lasery (dřevo, sklo) a vláknové lasery. [25]



Obrázek 9-Gravírování a značení [12]

2.4.2. Tepelné zpracování

Laserové záření se využívá pro povrchové kalení, typicky v automobilovém, lodním, drážním, zemědělském a vojenském strojírenství pro opracování součástí jako klikové hřídele, vačkové hřídele, pístní kroužky, ozubená kola nebo lopatky turbín. [12] [13]

Přednostmi tepelného zpracování laserem jsou:

- Malé tepelně ovlivněné pásmo (zachování houževnatosti neovlivněného materiálu)
- Nízká tepelná deformace
- Velmi homogenní zakalená vrstva
- není potřeba chlazení výrobku
- může být konečnou operací výroby [13] [14]

Ke kalení se v průmyslu využívají především diodové lasery pracující v kontinuálním módu s široce roztaženým paprskem o výkonu několika kilowattů. [15]



Obrázek 10-Kalení ozubení [12]

2.4.3. Mikroobrábění

Používají se výkonné pulzní Nd:YAG lasery a nebo vláknové lasery. Rozdíl mezi mikroobráběním a gravírováním spočívá v množství odebírané vrstvy materiálu a přesnosti obrábění. Při gravírování je důležitý výsledný vzhled. [19]

Vrtání

Paprsek dopadá na materiál v krátkých impulzech a natavuje materiál. Ten při odpaření prudce zvětší svůj objem ve vrtaném otvoru. Tím vznikne vysoký tlak, který pomáhá k vypuzení roztaveného materiálu ven z otvoru. Při vrtání otvorů do keramiky či tvrdokovů je laserové vrtání nenahraditelné. [16] [17]

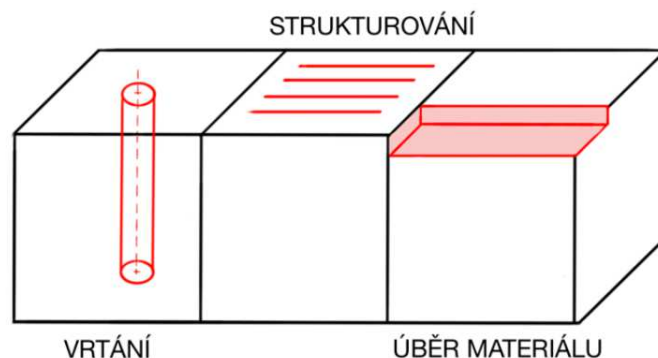
Dále je možné vrtání laserem s ultrakrátkým pulsem bez roztavení materiálu, kdy dochází k jeho přímému odpaření. Při tomto způsobu vrtání se součást nezahřívá. [17]

Strukturování

Principem je vytvoření pravidelné geometrie na povrchu materiálu. Využívá se ke zlepšení optických nebo kluzných vlastností výrobku nebo při výrobě solárních panelů. [18]

Laserový úběr

Používá se při výrobě nástrojů a forem a také v elektronice. Vzniká vysoce fokusovaným paprskem, který lokálně ohřeje materiál, nataví jej a poté se začne odpařovat. V místě dopadu paprsku se vytváří otvor. [19]



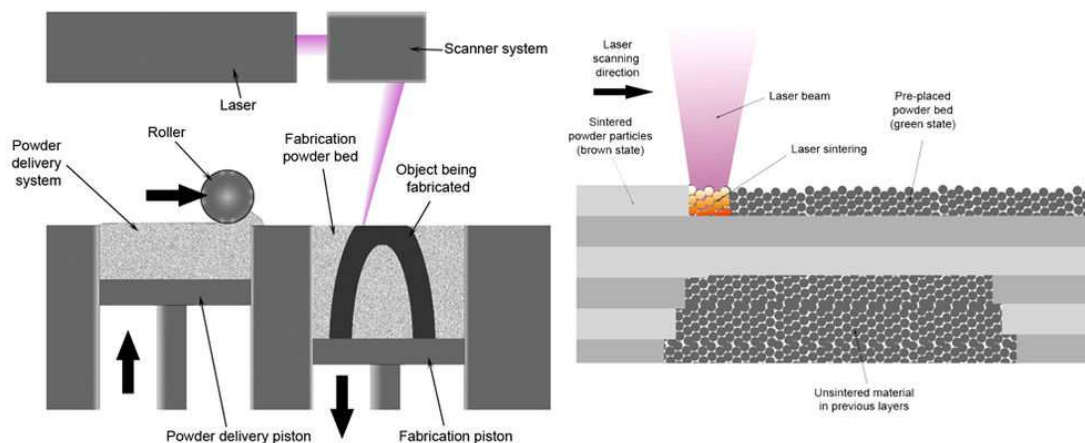
Obrázek 11-Mikroobrábění [18]

2.4.4. Leštění a čištění

Používají se pulzní Nd:YAG a Nd:YVO4 lasery s mikrosekundovou nebo nanosekundovou délkou trvání paprsku. Při laserovém čištění laserový svazek zahřeje odstraňovaný materiál, čímž dojde k jeho odpaření. Nedochází zde k tepelným deformacím. Používá se při čištění tiskařských válců, nástrojů pro PVD nebo tvarově náročných forem. U leštění dochází k přetavení povrchové vrstvy materiálu s cílem jejího vyhlazení za působení povrchového pnutí. Většinou se používá k leštění kovových materiálů, zvláště pak nástrojových ocelí. [20] [21]

2.4.5. 3D tisk kovů

Nejpopulárnější metodou pro 3D tisk kovů je laserové spékání kovů (selectiv laser sintering - SLS). Metoda spočívá v nanesení vrstvy práškového materiálu (kov, sklo, keramika) na základovou platformu a jeho ohřátí na teplotu blízkou jeho bodu tání. Jakmile laser osvítí příslušnou plochu, prášek se speče, základová deska klesne o tloušťku jedné vrstvy a je nanesena nová vrstva prášku. Díky této metodě jsme schopni vytvářet velmi složité struktury. [22] [23]

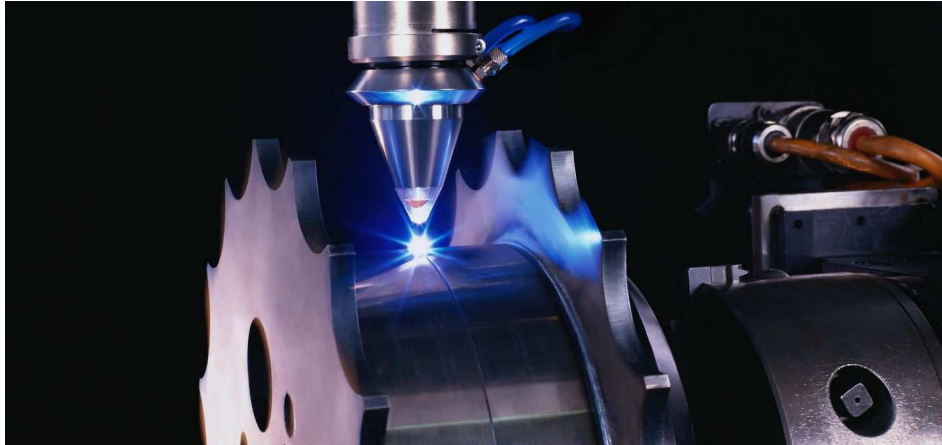


Obrázek 12-Selectiv laser sintering [22]

2.4.6. Svařování

Základní předností laserového svařování je vysoká výkonová hustota laserového paprsku spolu s krátkou dobou působení, díky nimž dochází k nízkému tepelnému ovlivnění. Jsme schopni vytvářet jak bodové svary, tak i svary hluboké dlouhé několik metrů. Podle nastavení výkonu a průměru fokusovaného získáváme konkrétní velikost hustoty výkonu svazku, podle níž dělíme metody svařování na indukční, penetrační a keyhole. Aby použití laseru bylo ekonomicky vhodné, je třeba ho použít pro velkosériovou výrobu. [12] [24] [17]

Svařování touto metodou se využívá v mnoha odvětvích strojího průmyslu, převážně však při robotickém svařování karoserií automobilů. Nejčastějšími zdroji v dnešní době jsou vláknové lasery dosahující výkonů až do 120 kW. [12] [26]



Obrázek 13-Svařování laserovým paprskem [24]

2.4.7. Laserové navařování

Laserové navařování je metoda, která se používá pro opravy poškozených povrchů, nebo pro vytvoření funkčního povlaku za účelem zlepšení jeho vlastností (odolnost vůči otěru, oxidaci atd.). Při navařování dochází k natavení navařovaného materiálu, který je v podobě prášku, ale také základního materiálu. Tím dochází k vytvoření metalurgické vazby s velmi dobrou kohezí a adhezí mezi povlakem a povlakovanou součástí. [51] [52]

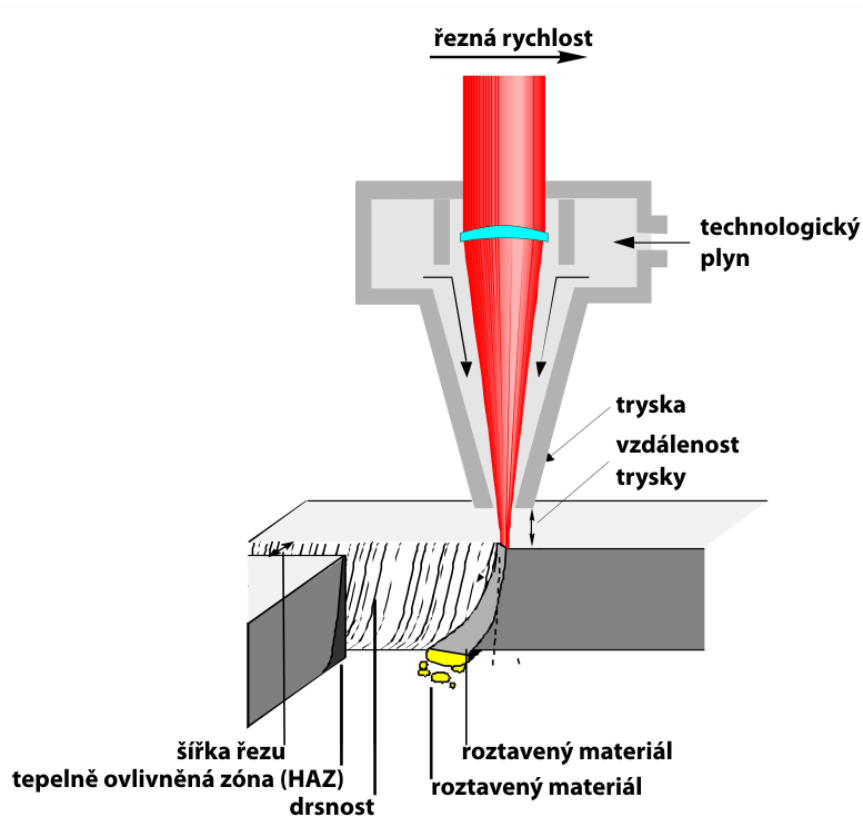
2.4.8. Řezání

Technologii řezání spočívá v odstranění materiálu z řezné spáry působením laserového svazku. Tato technologie bude blíže popsána v kapitole 2.5.

2.5. Technologie laserového řezání

Laserové řezání je proces, při kterém fokusovaný paprsek s vysokou intenzitou výkonu umožňuje dělit celou řadu materiálů s vynikající kvalitou řezu a to buď v systémech plotterových (2D) nebo robotických (3D). Není zde důležitá pevnost materiálu, ale jeho optické a tepelné vlastnosti. Velmi efektivně se dělí materiály s malou tepelnou vodivostí, vysokou absorpcí a nízkou reflektivitou. Je dosaženo velmi malé šířky řezu s minimální tepelně ovlivněnou oblastí. Proces je výrazně přesnější, rychlejší a ekonomičtější než tradiční mechanické techniky. Laserové řezání spadá do oblasti termického dělení stejně jako řezání plasmou nebo autogenem. [27] [17]

V současnosti se pro řezání nejvíce používají CO₂ a vláknové lasery s výkony od 100 W do 20 kW u CO₂ laserů a do 10 kW u vláknových laserů. Dělení laserovým paprskem je vhodné pro tloušťky kovových materiálů až do 30 mm. Pro větší tloušťky je nutno použít jinou metodu dělení. [27] [17]



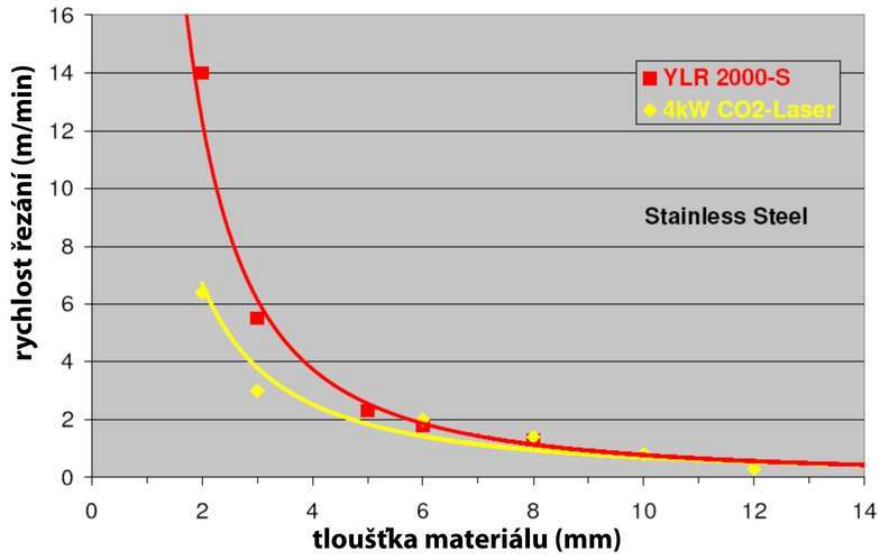
Obrázek 14-Schéma laserového řezání [31]

Pro řezání je vhodné použít asistenční plyn. V závislosti na užití asistenčního plynu dělíme metody řezání na: [31]

- Tavné
- Oxidační
- Sublimační

2.5.1. Tavné laserové řezání

Při tavném řezání je materiál nataven a vzniklá tavenina se vyfukuje proudem inertního plynu, který se přivádí z procesní hlavy do místa řezu. Jako asistenční plyn se používá ve většině případů čistý dusík, dále je pak možno použít argon (pro řezání titanu). Tento plyn zároveň izoluje hranu řezu před oxidací, tudíž není nutné ve většině případů hranu dále obrábět. Tlak plynu se pohybuje od 2 do 20 barů, výjimečně až do 30 barů. Tavné řezání se používá převážně pro řezání vysoce legovaných ocelí, korozivzdorných ocelí, hliníku, mosazi, bronzu. [30] [31]



Obrázek 15-Porovnání řezných rychlostí v závislosti na tloušťce materiálu [31]

2.5.2. Sublimační řezání

Je to způsob řezání, při kterém se materiál přímo odpařuje. Výpary z materiálu vytváří tlak, který taveninu vymrští směrem nahoru a dolů. Jako procesní plyn se v některých případech používá dusík, argon nebo helium o tlaku 1-3 bary. Plyn má v tomto případě pouze funkci ochrany proti oxidaci. Odpařování materiálu vyžaduje více energie než tavení, proto jsou používány lasery s vysokými výkony. Sublimační řezání je pomalejší než ostatní metody, zato vytváří kvalitní hranu řezu. Nevyužívá se k obrábění plechů, ale především k obzvláště jemnému řezání v lékařské technice. [31] [32]

2.5.3. Oxidační řezání

Tato metoda se používá pro řezání konstrukčních ocelí o tloušťce až 30 mm. Jako asistenční plyn se zde využívá kyslík, jehož funkcí je podpoření hoření materiálu-dochází k exotermické reakci. Při řezání tenkých plechů se tlak plynu pohybuje do 6 barů, při pálení silnějších materiálů se využívá tzv. duální tryska a tlak do 1 baru. Řezná hrana je s okujemi a má poměrně velkou drsnost. Řezná spára je širší než u ostatních metod, ale díky dodané energii hořením je možné dosáhnout vyšších rychlostí. Oxidační řezání není vhodné pro řezání ostrých geometrických tvarů a malých dílců (dochází k upálení) - užívá se tzv. modulace výkonu. [31] [33]

2.5.4. Výhody a nevýhody laserového řezání

[39] [40]

Výhody:

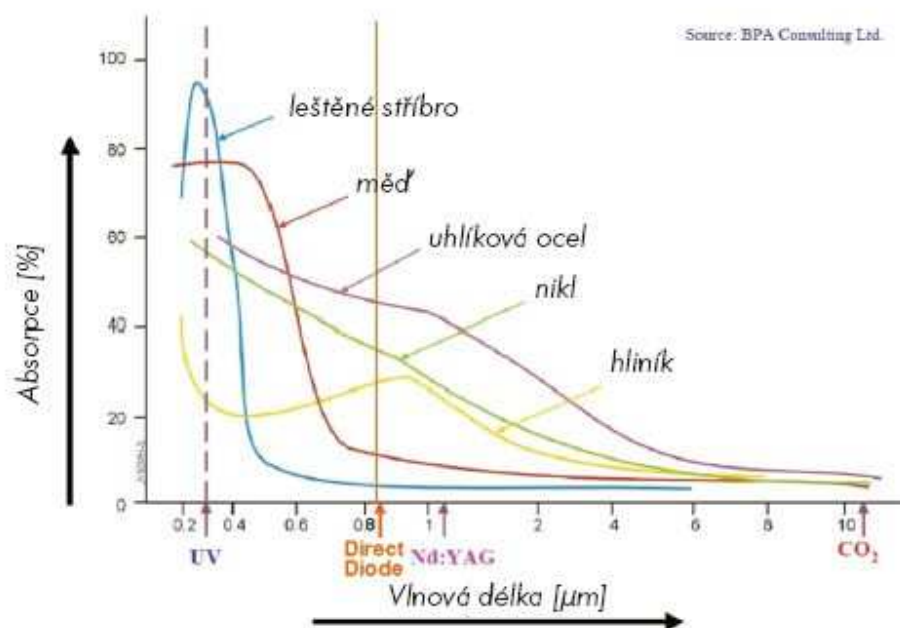
- Vysoká přesnost u slabých a středních tlouštěk
- Řezání velmi malých otvorů, úzkých pásků, tvarů s ostrými úhly
- Pravoúhlá řezná hrana
- Malá tepelně ovlivněná oblast
- Malá šířka řezné spáry

Nevýhody:

- Velké investiční a provozní náklady
- Omezení tloušťky materiálu
- Snížená stabilita procesu při řezání lesklých povrchů

2.6. Lasery používané pro řezání

Nejrozšířenější laserovou technologií je právě řezání. První laserový systém byl postaven ve Velké Británii v roce 1967 a sloužil k řezání ocelových plechů s použitím kyslíku jako asistenčního plynu. Od sedmdesátých let minulého století docházelo k masivnímu rozšíření CO₂ laserů a jejich následnému zdokonalování. V současné době jsou CO₂ lasery nahrazovány vláknovými, které mají větší účinnost, nižší provozní náklady a delší životnost. [34]

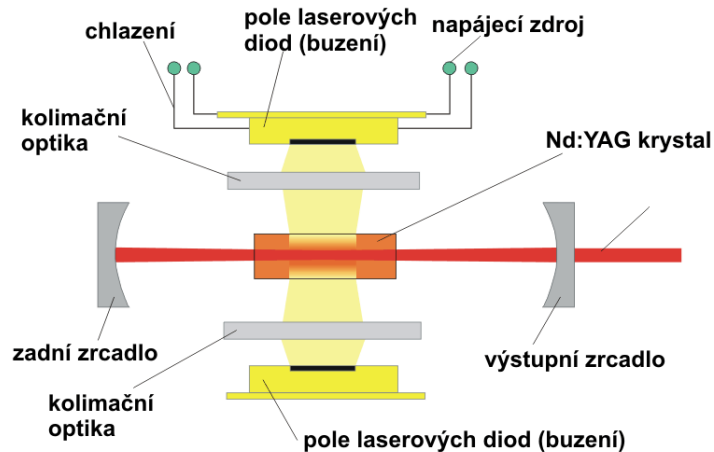


Obrázek 16-Absorpce kovů [41]

2.6.1. Nd:YAG laser

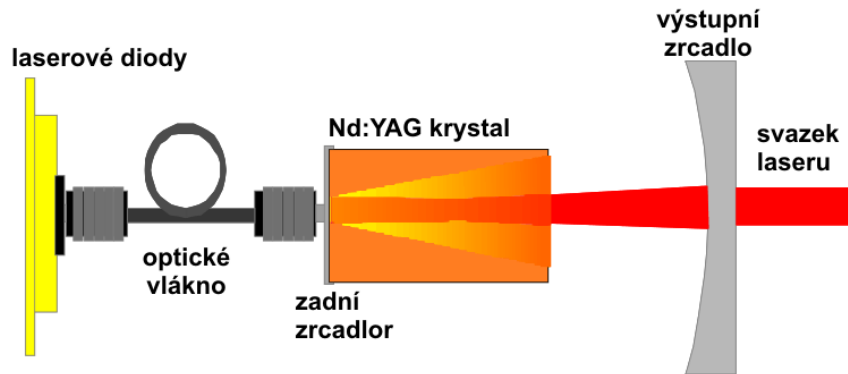
Neodym: ytrium-aluminium garnet je nejstarší zástupce z řady laserů používaných k termickému dělení materiálu. Existují dva druhy, a to buď LPSS-lamp pumped solid state (buzený výbojkami) a nebo DPSS-diode pumped solid state (buzený laserovými diodami). LPSS Nd:YAG mají horší účinnost, neboť dochází k přeměně velké části energie z výbojky na teplo (nutné chlazení vodou). DPSS Nd:YAG mají účinnost větší a vyznačují se i lepší kvalitou laserového svazku. [34]

Dnes se LPSS Nd:YAG využívají většinou v pulsním režimu pro svařování (malá teplotně ovlivněná zóna, hluboký průvar) a vrtání a to především díky schopnosti dosáhnout vysoké energie v pulsu (100 J/ms). Nevýhodou je již zmíněná nízká účinnost, náročnost chlazení, vysoké provozní náklady a krátká životnost výbojek pohybující se okolo 1000 hodin. [34]



Obrázek 17-Schéma LPSS Nd:YAG [34]

DPSS Nd:YAG se dále rozlišuje dle uspořádání rezonátoru na boční (transversální) a na zadní (end-pumped). U zadního vedení dosahujeme lepší kvality svazku, ale nižších výkonů, zatímco u bočního vedení je to naopak, tam dosahujeme vyšších výkonů, ale nižší kvality laserového svazku. Tento typ se využívá pro značení a gravírování kovů a dalších různých materiálů. Průměrný výkon se pohybuje do 100 W. [34]



Obrázek 18-Schéma DPSS Nd:YAG [34]

Využití těchto laserů již několik let klesá, jsou nahrazovány účinnějšími vláknovými pulsními lasery. [34]

Hlavními výrobci jsou Roфин, Coherent a další. [34]

2.6.2. Diskový laser

Je to jedna z modifikací Nd:YAG laseru. Aktivní prostředí je tvořeno malým diskem. Jejich výhodou je rovný teplotní profil po celém disku. Díky tomu je schopný dosahovat výkonů až 16 kW s dobrou kvalitou výstupního svazku. Nevýhodou je menší účinnost a nižší životnost než u vláknových laserů. [9] [34]



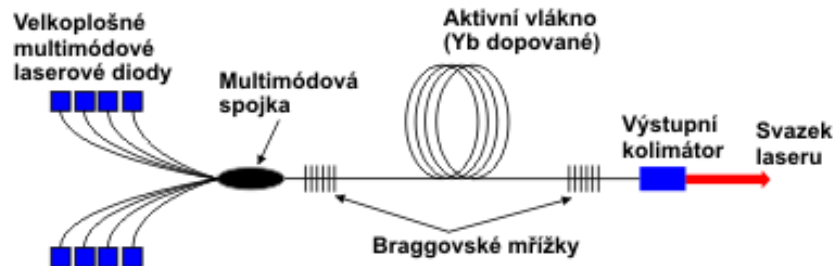
Obrázek 19-Diskový laser [34]

Hlavním výrobcem je především firma Trumpf. [34]

2.6.3. Vláknový laser

Vláknový (fiber) laser je v současné době nejmodernější typ pevnolátkového laseru. Aktivním prostředím je zde samotné optické vlákno dopované yterbiem. Pro buzení se používají nízkovýkonové polovodičové LED diody. Buzení je vedeno přes

optickou spojku až do optického vlákna. Záření pak vychází ven pomocí optického kolimátoru. [34]



Obrázek 20-Schéma vláknového laseru [34]

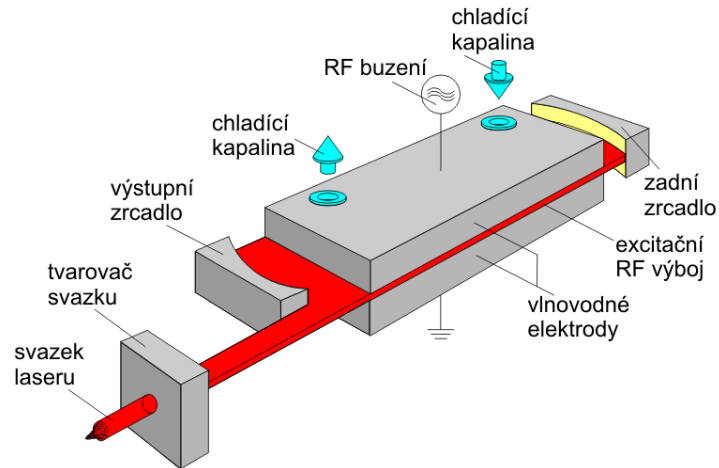
Optické vlákno vláknového laseru má strukturu tzv. Braggovy mřížky. Je to struktura vzniklá periodickými nebo kvaziperiodickými změnami indexu lomu v jádře optického vlákna podél jeho osy. [34]

Dělí se dle pracovního cyklu na kontinuální (CW), pulsní nebo kvazipulsní (QCW). Jejich výhodou je jednoduchost - samotný laser tvoří vlastně optické vlákno, robustnost a modularita - laser je tvořen laserovými moduly, jejichž spojováním můžeme dosáhnout výkonu až 120 kW. Dále mají vláknové lasery vysokou účinnost (přesahující 50 %), vysokou životnost (až 100 000 hodin), malé prostorové nároky, nízké náklady na provoz a údržbu a v neposlední řadě mají vysokou kvalitu laserového svazku. [9]

Hlavním výrobcem je IPG Photonics, Rofin, Trumpf. [34] [25]

2.6.4. CO₂ laser

Aktivním prostředím je směs plynů obsahující CO₂. V průmyslových aplikacích se používají buzené buď elektrickým výbojem (DC-direct current) a nebo radio-frekvenčně (RF). Dále se mohou dělit na tzv. sealed off lasery (s hermeticky uzavřeným rezonátorem) a na průtočné, kdy plyn neustále proudí rezonátorem, což je nutné u vysokých výkonů (od 10 kW). [34]



Obrázek 21-Schéma difúzně chlazeného RF buzeného CO₂ laseru [34]

CO₂ lasery s výkonem do 1,5 kW se využívají pro značení, gravírování a řezání nekovů (plasty, plexisklo, kůže, papír apod.), kdy nelze použít lasery s vlnovou délkou 1 μm. Lasery s výkonem až do 20 kW jsou určeny k řezání kovů a ke svařování. [34]

Pro vedení laserového paprsku se musí použít soustava zrcadel, což je jejich velká nevýhoda - složitá optická dráha, nutnost pravidelné kalibrace, vysoké nároky na údržbu. [34]

Hlavními výrobci jsou Coherent, Rofin, Trumpf, Synrad. [34]

3. Experimentální část

Vanad 2000 a.s. je výrobcem strojů mimo jiné i pro laserové řezání. Tyto stroje jsou využívány pro řezání materiálů nejrůznějšího složení. Je tedy nutné pro každý materiál vyhledat optimální řezné podmínky a právě z tohoto důvodu, byl navrhnut tento experiment, který zadavateli usnadní optimalizaci řezného procesu.

3.1. Návrh experimentu

Experiment byl proveden ve firmě Vanad 2000 a.s. Spočíval ve vypálení sady vzorků o tloušťce 5 mm z nerezové oceli, konstrukční oceli a hliníku za použití asistenčních plynů kyslíku, dusíku a vzduchu. V tabulce 2 je uvedeno použití asistenčních plynů pro daný materiál.

Tabulka 2-Použití asistenčních plynů v závislosti na použitém materiálu

	Nerezová ocel - SS	Konstrukční ocel - MS	Hliník - Al
Kyslík - O₂	<i>NE</i>	<i>ANO</i>	<i>NE</i>
Dusík - N₂	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>
Vzduch - AIR	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>	<i>ANO</i>

Pro daný materiál a daný plyn bylo vyhotoveno 5 vzorků lišící se pouze řeznými rychlostmi. Testovací vzorek byl zvolen jako obdélník o rozměrech 50 mm x 20 mm se zaoblenými rohy s poloměrem 5mm. Vzhledem k tomu, že laserový zdroj byl u zadavatele instalován nově, nebyly dostupné žádné technologické tabulky a musely být nejprve vytvořeny. Nalezením optimálních řezných parametrů byla nalezena i optimální řezná rychlost, která se stala výchozí rychlostí v experimentu. Od ní byly odstupňovány další řezné rychlosti v pravidelných intervalech končících rychlostí 1 m/min. Řezání rychlostí nižší než 1 m/min není z ekonomického hlediska vhodné. Tabulky 3 a 4 ukazují nastavení řezných rychlostí v závislosti na použitém materiálu a plynu.

Tabulka 3-Použité řezné rychlosti pro konstrukční ocel

MS O ₂		MS AIR		MS N ₂	
v _{max}	3,2	v _{max}	6	v _{max}	5,5
v _{min}	1	v _{min}	1	v _{min}	1
rozdíl	2,2	rozdíl	5	rozdíl	4,5
krok	0,55	krok	1,25	krok	1,13
v₁	3,2	v₁	6,0	v₁	5,5
v₂	2,65	v₂	4,75	v₂	4,4
v₃	2,1	v₃	3,5	v₃	3,25
v₄	1,55	v₄	2,25	v₄	2,1
v₅	1,0	v₅	1,0	v₅	1,0

Tabulka 4-Použité řezné rychlosti pro nerezovou ocel a hliník

SS AIR		SS N ₂		AL AIR		AL N ₂	
v _{max}	6,5	v _{max}	5,25	v _{max}	5	v _{max}	5,2
v _{min}	1	v _{min}	1	v _{min}	1	v _{min}	1
rozdíl	5,5	rozdíl	4,25	rozdíl	4	rozdíl	4,2
krok	1,38	krok	1,06	krok	1	krok	1,05
v ₁	6,5	v ₁	5,25	v ₁	5,0	v ₁	5,2
v ₂	5,1	v ₂	4,2	v ₂	4,0	v ₂	4,15
v ₃	3,75	v ₃	3,1	v ₃	3,0	v ₃	3,1
v ₄	2,4	v ₄	2,1	v ₄	2,0	v ₄	2,05
v ₅	1,0	v ₅	1,0	v ₅	1,0	v ₅	1,0

Tabulky 5 a 6 ukazují ceny řezu u řezání testovacího vzorku dusíkem z nerezové oceli o síle 5 mm optimální řeznou rychlostí, tj. 5,25 m/min a zvolenou minimální rychlostí 1 m/min.

Tabulka 5-Cena řezu při řezání rychlostí v = 5,25 m/s

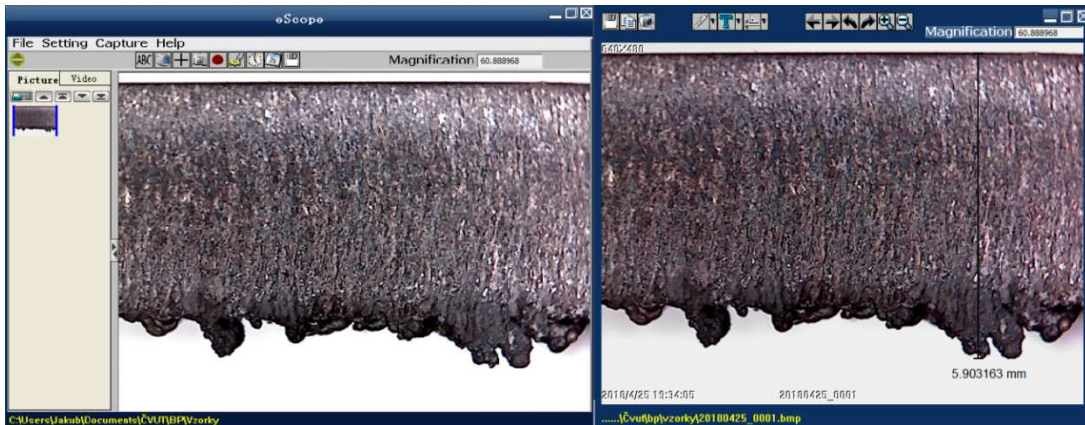
Spotřeba pro:	SS 5 mm N ₂	41,328 m ³ /hod	
Čas řezu:		6 s	
Příkon:		10,5 kW	
Spotřebovaný plyn:		0,06888 m ³	
Cena za m ³ :	5.0	81,77 Kč	5,63 Kč
Spotřebovaná energie:		0,014 kW	
Cena za kWh:		5 Kč	0,07 Kč
Spotřebovaný materiál:		0,001 m ²	
Cena za 1000x1000x5:		2744 Kč	2,744 Kč
Celkem:			8,45 Kč

Tabulka 6-Cena řezu při řezání rychlostí v = 1 m/s

Spotřeba pro:	SS 5 mm N ₂	41,328 m ³ /hod	
Čas řezu:		12 s	
Příkon:		10,5 kW	
Spotřebovaný plyn:		0,13776 m ³	
Cena za m ³ :	5.0	81,77 Kč	11,26 Kč
Spotřebovaná energie:		0,028 kW	
Cena za kWh:		5 Kč	0,14 Kč
Spotřebovaný materiál:		0,001 m ²	
Cena za 1000x1000x5:		2744 Kč	2,744 Kč
Celkem:			14,15 Kč

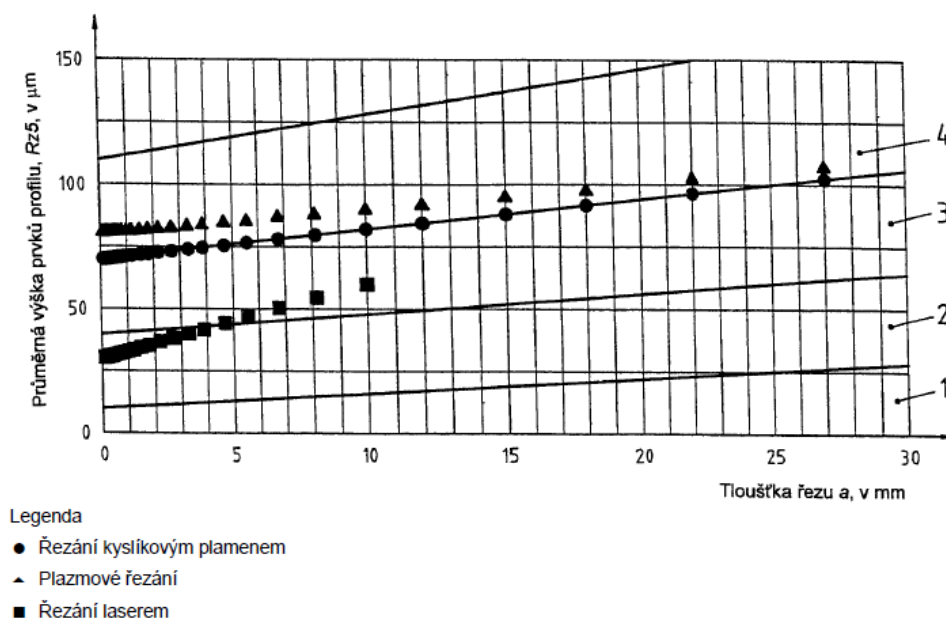
Při použití řezné rychlosti 1 m/min je čas řezu dvojnásobný oproti času řezu u optimální řezné rychlosti. Cenový rozdíl činí 5,7 Kč. Pokud bychom řezali rozměrnější výpalek, cenový rozdíl by byl mnohem větší.

Po vytvoření vzorků bylo provedeno měření velikosti největšího ořepu pomocí digitální mikroskopové USB kamery.



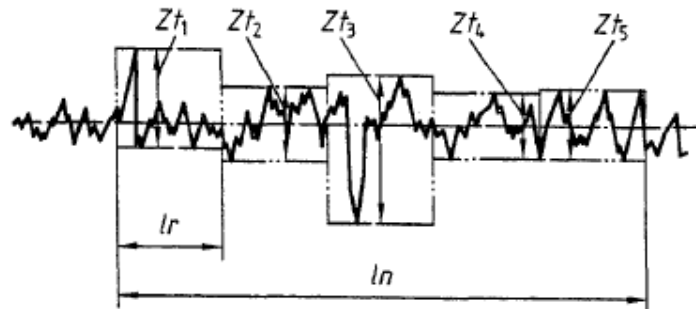
Obrázek 22-Měření velikosti ořepu digitální mikroskopovou kamerou

Jakost povrchu řezné hrany můžeme vyhodnocovat mnoha různými způsoby. U metod termického dělení se při hodnocení řídíme normou ISO 9013:2002, což je norma zabývající se geometrickými požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu při termickém dělení, která předepisuje měření pomocí parametru Rz5. Pro měření byl použit kalibrováný profiloměr MarSurf XCR 20 na ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Pro každý výpalek byla vyhodnocena třikrát drsnost Rz5 a tato hodnota byla zprůměrována. Poloha měření byla u všech vzorků na řezné hraně naproti propalu.



Obrázek 23-Typicky dosažitelné hodnoty průměrné výšky prvků profilu, Rz5[53]

Dle normy ISO 9013:2002 jsou předepsány dva parametry, Z_t a Rz_5 . Z_t je výška profilu prvku a Rz_5 je aritmetický průměr z jednotlivých výšek prvků profilu. Měření je nutné provádět na kartáčovaných řezech očištěných od oxidů a mimo oblasti s vadami. Počet měřicích míst musí být stanoven výrobcem. Pokud nejsou stanoveny žádné podmínky, musí být provedeno jedno měření na každý metr řezu. Charakteristická hodnota Rz_5 se stanovuje v omezené oblasti povrchu a to v místě maximální drsnosti povrchu řezné tloušťky. Pro řezání laserem to obvykle bývá v horní třetině od horní hrany řezu. Dále musí být Rz_5 měřena na úseku 15 mm délky řezu ve směru posuvu hořáku.



kde:

Z_{t1} až Z_{t5} charakterizuje jednotlivé prvky profilu;

l_n je celková vyhodnocovaná délka;

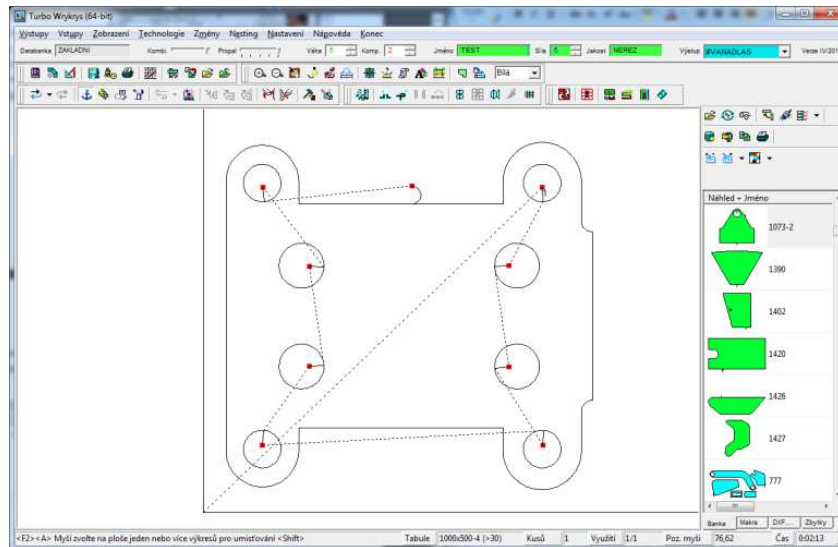
l_r je základní délka ($1/5$ z l_n).

Obrázek 24-Průměrná výška prvků profilu [53]

3.2. Použitá zařízení

3.2.1. Software WRYKRYŠ

K vytvoření testovacího vzorku bylo nejprve nutné vytvořit pálicí plán. K jeho tvorbě jsem použil český software WRYKRYŠ od společnosti ANRA. WRYKRYŠ je CAD/CAM program pro technologickou přípravu výroby na pálicích a řezacích CNC strojích.



Obrázek 25-WRYKRYS - hlavní plocha

Software má tyto tři hlavní obrazovky:

- Intercad - pro tvorbu vlastních výkresů nebo k editaci načtených DXF/DWG souborů
- Hlavní plocha - na hlavní ploše se umísťují do výkresu technologické prvky jako propaly, jejich velikost a umístění, mašle, můstky atd.
- Export sestavy - slouží k vytvoření pálicího plánu, volíme zde nástroje, volbu startovacího bodu

3.2.2. Vanad KOMPAKT Laser

Experiment byl proveden na stroji Vanad KOMPAKT laser s vláknovým laserem IPG YLS-4000-CUT a procesní hlavou Precitec Procutter. Dalším nezbytným příslušenstvím ke stroji je filtrační jednotka Kemper a šroubový kompresor Orlik ORL 11DX2.



Obrázek 26-Vanad KOMPACT Laser se zdrojem IPG a hlavou Precitec

Tabulka 7-Parametry stroje Vanad KOMPAKT Laser

Vanad KOMPAKT Laser		
Celkové rozměry stroje	[mm]	3200x8900x2200
Formát plechu	[mm]	1500x3000
Výška roštu	[mm]	855
Přesnost referování	[mm]	±0,005
Maximální rychlost	[m/min]	45,0
Maximální zrychlení	[m/s ²]	9,8
Motor	[W/Nm]	1005/1,6
Převodovky	typ	Premium
Industrial PCs	typ	APC910
Velikost panelu	inch	15

Tabulka 8-Parametry zdroje IPG

IPG YLS-4000-CUT		
Výkon	[W]	4000
Vlnová délka	[nm]	1070±10
Režim práce	typ	CW

3.2.3. Digitální mikroskopová USB kamera

Pro snímání velikosti otřepu byla použita kamera, která může přenášet nahrávaný obraz do počítače přes konektor USB. Díky integrované optice mohou být zvětšeně zachyceny i velice malé předměty nebo povrchy.


Obrázek 27-Digitální mikroskopová kamera

Tabulka 9-Parametry mikroskopové kamery

Senzor	3488 x 2616 pixelů
USB připojení	USB 2.0
Napájení	5 V
Osvětlení	8 bílých LED
Zvětšení	Max. 200x
Oblast zaměření	10 až 200 mm
Rozměry (Ø x D)	Cca 140 x 37 mm

3.2.4. Profiloměr MarSurf XCR 20

Kombinované měřicí pracoviště umožňuje provádění měření hloubky drsnosti a rovněž kontur na jednom měřicím pracovišti. V závislosti na měřicí úloze lze aktivovat posuvovou jednotku GD 25 pro měření hloubky drsnosti nebo posuvovou jednotku PCV pro měření kontur. [54]



Obrázek 28-MarSurf XCR 20

Tabulka 10-Technické parametry profiloměru

Snímací úhel	Na hladkých površích podle vybočení: klesající čela do 88°, stoupající čela do 77°
Snímaná délka (v ose X) konec	200 mm
Snímaná délka (v ose X) začátek	0,2 mm
Délka snímacího ramena	175 mm, 350 mm
Rychlost snímání (v Z)	0,1 až 1 mm/s
Poloměr hrotu snímače	25
Rychlost měření	0,2 mm/s až 4 mm/s
Princip měření	Dotyková metoda
Rozsah měření mm	(v ose Z) 50 mm MFW 250: $\pm 25 \mu\text{m}$, $\pm 250 \mu\text{m}$, (do $\pm 750 \mu\text{m}$); $\pm 1,000 \mu\text{in}$, $\pm 10,000 \mu\text{in}$, (do $\pm 30,000 \mu\text{in}$)
Snímaná délka	Automaticky; 0,56 mm; 1,75 mm; 5,6 mm; 17,5 mm, 56 mm, (.022 / .070 / .224 / .700 / 2.240 in),
Počet n jednotlivých měřicích délek podle ISO/JIS	1 až 50 (standard: 5)
Síla při měření (N)	1 mN až 120 mN, dolů a nahoru

3.3. Použité materiály

3.3.1. Konstrukční ocel S235JR (ČSN 11 375)

Nelegovaná jakostní konstrukční ocel, vhodná ke svařování všemi obvykle používanými metodami. S rostoucí tloušťkou a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko vzniku trhlin za studena v oblasti svaru. Materiál je dobře tváritelný za tepla i za studena. [44]

Ocel je vhodná pro svařované konstrukce se statickým i dynamickým namáháním, pro součásti energetického zařízení a tlakových nádob, na výrobu ohýbaných profilů a trubek, pro různé drobné tvářené a svařované součásti. [45]

Tabulka 11-Chemické složení oceli S235JR v %

C _{max} pro tloušťku do 16mm	Mn _{max}	Si _{max}	P _{max}	S _{max}	N _{max}
0,19	1,50	-	0,045	0,045	0,014

Tabulka 12-Mechanické vlastnosti oceli S235JR

R _m [MPa]	R _{eH} [MPa]	A _{min} [%]
360-510	235	26

3.3.2. Nerezová ocel X5CrNi18-10 (ČSN 17 240)

Jedná se o austenitickou korozivzdornou ocel, která velmi dobře odolává korozi v ne příliš znečištěném venkovním prostředí, pitné vodě, zředěné kyselině a některým organickým kyselinám. Dobře odolává produktům potravinářského průmyslu (ovocné šťávy, mléčné výrobky, pivo a další). Sníženou odolnost vykazuje vůči vínu, resp. vinnému moštu. V prostředí halogenidů může dojít k napadení bodovou korozi. Ve stavu po rozpouštěcím žíhání bez následného zcitlivění odolává též mezikrystalové korozi. Ke zcitlivění a vzniku náchylnosti k mezikrystalové korozi může dojít, je-li ocel vystavena po určitou dobu teplotám v rozmezí 500 až 900°C. [42]

Tato ocel je bez potíží svařitelná, lze ji obrábět (nutno dbát na správné řezné parametry) a je dobře tvářitelná. Používá se zejména v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, v chemickém průmyslu k výrobě zařízení pro sterilizaci produktů jako jsou kyselina dusičná, dusičnany, dusičnatá hnojiva a výbušné látky. [43]

Tabulka 13-Chemické složení oceli X5CrNi18-10 v %

C _{max}	Si _{max}	Mn _{max}	P _{max}	S _{max}	N _{max}	Cr	Ni
0,07	1,00	2,00	0,045	0,030	0,11	17,00-19,50	8,00-10,50

Tabulka 14-Mechanické vlastnosti oceli X5CrNi18-10

R _m [MPa]	R _{eH} [MPa]	A _{min} [%]
500-750	210-260	45

3.3.3. Hliník EN AW-1050A H24 (ČSN 42 4005)

Nelegovaný hliník s maximálním obsahem nečistot 0,5%. Má excelentní odolnost vůči korozi v normálních atmosférických podmínkách. Materiál je tepelně nevytvrditelný. Zvýšení pevnosti je možné tvářením za studena. Ve vytvrzeném stavu H24 je tvářitelnost podstatně nižší než u nevytvrděného materiálu. Je dobře svařitelný běžnými metodami pro svařování hliníku. Není vhodný pro obrábění. Používá se k výrobě zásobních nádrží, výměníků tepla, reflektorů, obalových materiálu atd. [46] [47] [48]

Tabulka 15-Chemické složení hliníku EN AW-1050A H24

Al _{min}	Si _{max}	Fe _{max}	Cu _{max}	Zn _{max}	Ti _{max}
99,50	0,30	0,40	0,05	0,07	0,05

Tabulka 16-Mechanické vlastnosti hliníku EN AW-1050A H24

R _m [MPa]	R _{eH} [MPa]	A _{min} [%]
105-145	85	6

3.4. Použité plyny

3.4.1. Kyslík 3.5

Je vhodný pro laserové řezání konstrukčních ocelí, pro plazmové a autogenní technologie. Dosahuje vysoké produktivity a kvalitního řezu. Dále se využívá v elektrotechnice, jemné mechanice. Plyn je bez chuti, barvy a zápachu. Je nejedovatý, velmi intenzivně podporuje hoření, tvoří sloučeniny téměř se všemi prvky kromě inertních plynů. Hustota kyslíku je $1,409 \text{ kg/m}^3$. [49]

Tabulka 17-Složení kyslíku 3.5

$O_{2\min}$	H_2O_{\max}	$C_nH_{m\max}$	Vzduchové složky $_{\max}$
99,50 %	5 ml.m^{-3}	15 ml.m^{-3}	0,05%

3.4.2. Dusík 5.0

Používá se pro laserové řezání legovaných ocelí a slitin hliníku a pro plasmové technologie. Dále jako ochranný a proplachovací plyn v metalurgii, v chemickém, potravinářském a elektronickém průmyslu, jako ochranný a nosný plyn v polovodičovém průmyslu a jako nulovací plyn v měřicí technice k nastavení nuly přístroje. Plyn je bez chuti, barvy a zápachu, je nehořlavý a nejedovatý. Je to netečný plyn s výjimkou vysokých teplot, kdy s některými kovy vytváří nitridy. Hustota dusíku je $1,234 \text{ kg/m}^3$. [50]

Tabulka 18-Složení dusíku 5.0

$N_{2\min}$	H_2O_{\max}	$O_{2\max}$
99,999 %	5 ml.m^{-3}	3 ml.m^{-3}

3.4.3. Vzduch

O dodávku stlačeného vzduchu se stará šroubový kompresor Orlík ORL 11DX2. Maximální konstantní tlak, který je schopen dodat do laserového zařízení je 12,5 bar. Hustota suchého vzduchu je $1,29 \text{ kg/m}^3$ při $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a 101 325 Pa. [55]

Tabulka 19-Složení vzduchu

N_2	O_2	Ar	Ostatní plyny a vodní páry
78,09 %	20,95 %	0,93 %	0,03 %

3.5. Naměřená data

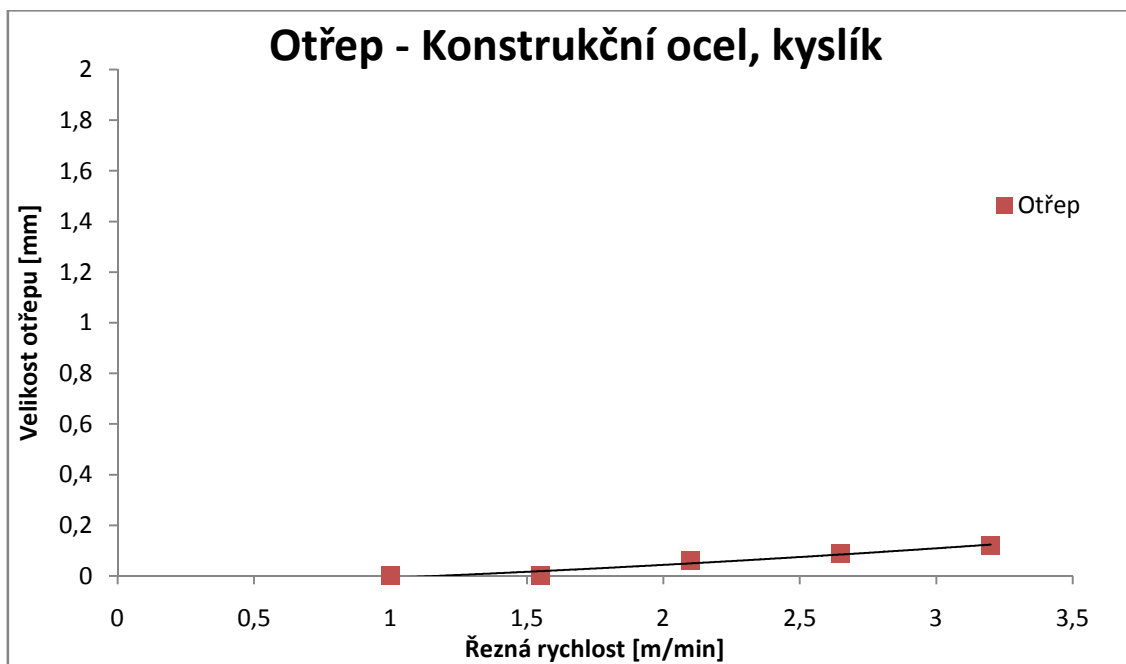
Pořízené makroskopické snímky vzorků, snímky z digitální mikroskopové kamery, technologické parametry a naměřené hodnoty byly zaneseny do protokolů, které jsou umístěny v textových přílohách.

4. Vyhodnocení

Naměřené hodnoty velikostí otřepů a drsností byly zpracovány do grafů, kde byly aproximovány polynomem 2. stupně. Pro přesnější vyhodnocení závislostí by bylo třeba rozdělit zkoumanou oblast použitých řezných rychlostí na více segmentů. U závislosti drsnosti Rz5 na řezné rychlosti byly do grafu zaneseny chybové úsečky se směrodatnou odchylkou, která byla spočtena z naměřených hodnot.

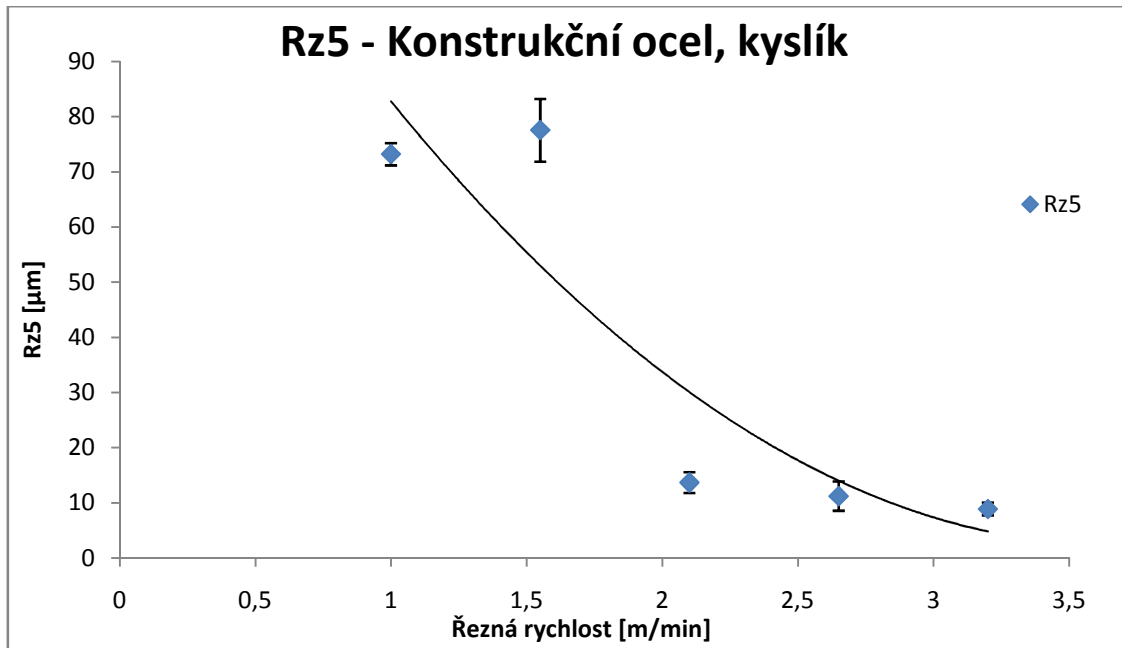
4.1. Hodnocení kvality řezu oceli S235JR řezané kyslíkem

U konstrukční oceli S235JR, kde byl použit asistenční plyn kyslík lze vidět, že velikost otřepu od rychlosti 1,55 m/min takřka lineárně roste. Nicméně u všech rychlostí lze vzniklý otřep velmi snadno odstranit například ocelovým kartáčem a jeho výskyt je minimální.



Obrázek 29-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané kyslíkem

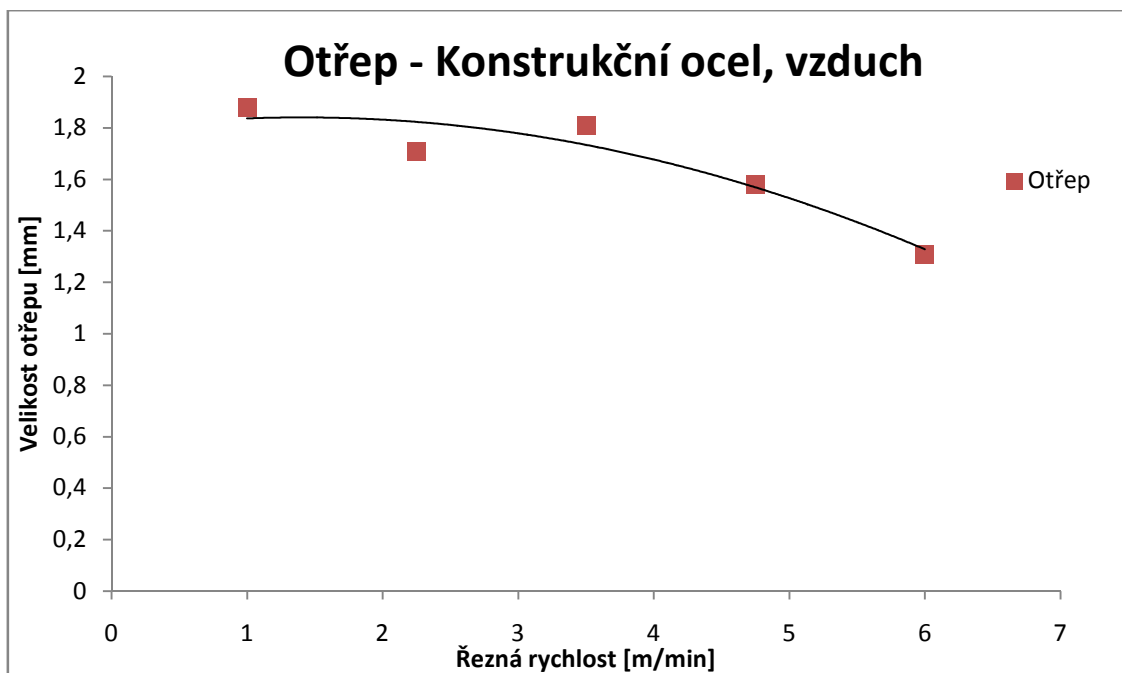
Parametr drsnosti Rz5 se zvětšující se rychlostí naopak klesá. Od rychlosti 2,1 m/min se hodnoty Rz5 pohybují v přijatelném rozmezí 13,7 μm až 8,9 μm . Z pořízených snímků z digitální kamery je patrné, že u menších rychlostí než 1,55 m/min je řez velmi nekvalitní.



Obrázek 30-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané kyslíkem

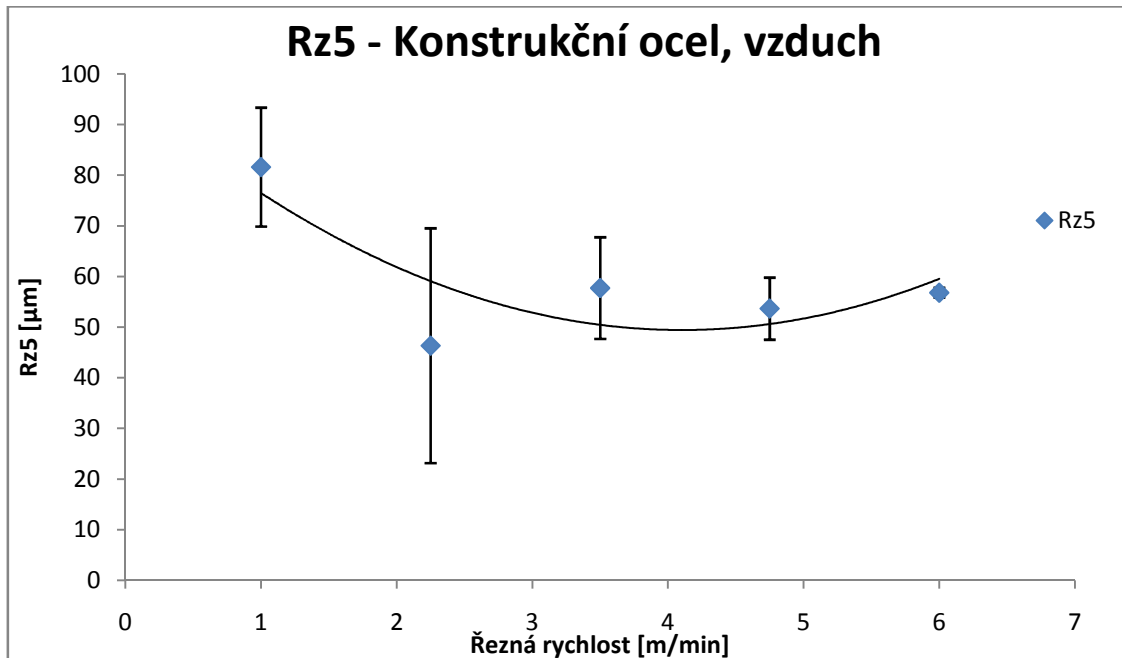
4.2. Hodnocení kvality řezu oceli S235JR řezané vzduchem

Z grafu velikosti otřepu v závislosti na řezné rychlosti u konstrukční oceli řezané vzduchem lze pozorovat nárůst otřepu s klesající rychlostí řezu. Při rychlosti 6 m/min dosahuje minimální velikosti 1,31 mm, u rychlosti 1 m/min je to 1,88 mm. V celém spektru použitých rychlostí je otřep odstranitelný pouze broušením.



Obrázek 31-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané vzduchem

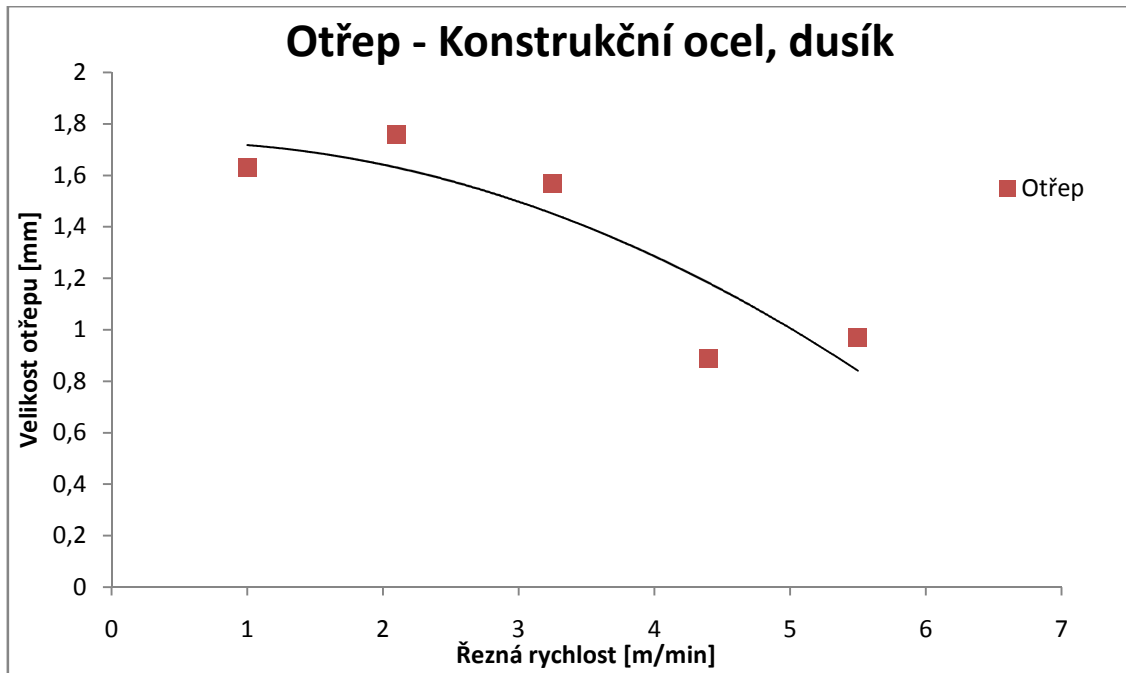
Hodnoty parametru Rz5 se snižující se rychlostí řezu výrazněji rostou. Nejmenší hodnota Rz5 se nachází v rozmezí rychlostí 4,75 m/min až 6 m/min a to v rozmezí od 53,7 μm až 56,8 μm . U rychlosti 2,25 m/min byla naměřena drsnost 46,4 μm s velkým rozptylem hodnot, z čehož lze usoudit, že došlo ke zkreslení dat při měření.



Obrázek 32-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané vzduchem

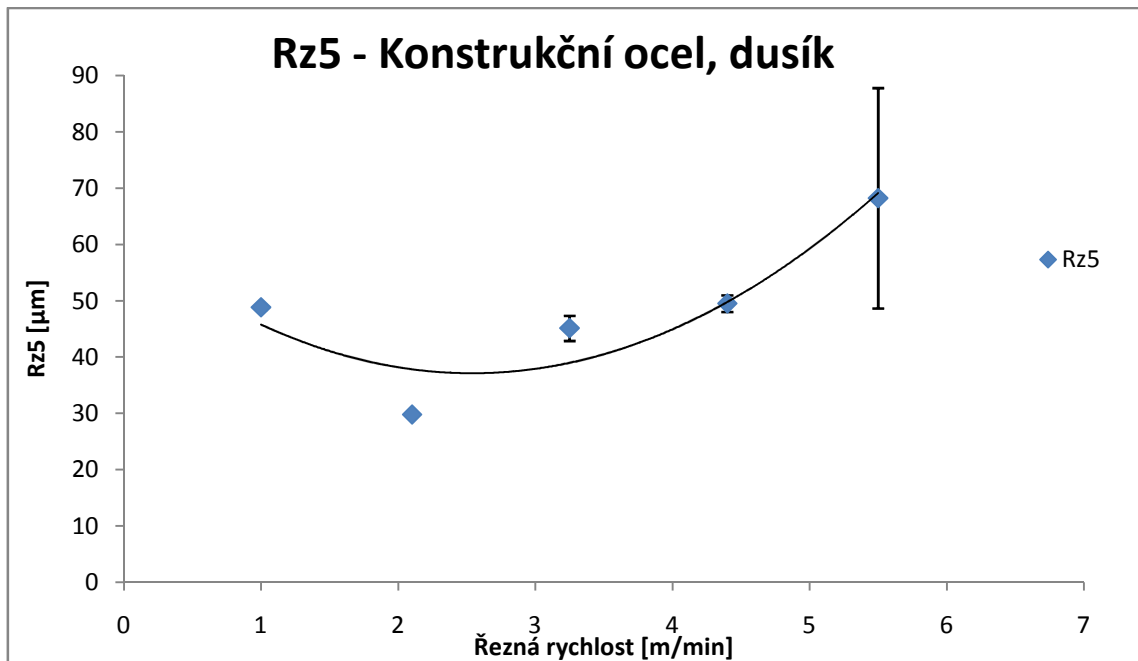
4.3. Hodnocení kvality řezu oceli S235JR řezané dusíkem

Při použití dusíku je pozorován podobný průběh velikosti otřepu jako u vzduchu, ale je dosahováno nižších hodnot. Nejmenší otřep je při rychlosti 5,5 m/min a to 0,97 mm. S klesající rychlostí roste a při rychlosti 1 m/min dosahuje otřep velikosti 1,63 mm. Otřep je odstranitelný broušením.



Obrázek 33-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané dusíkem

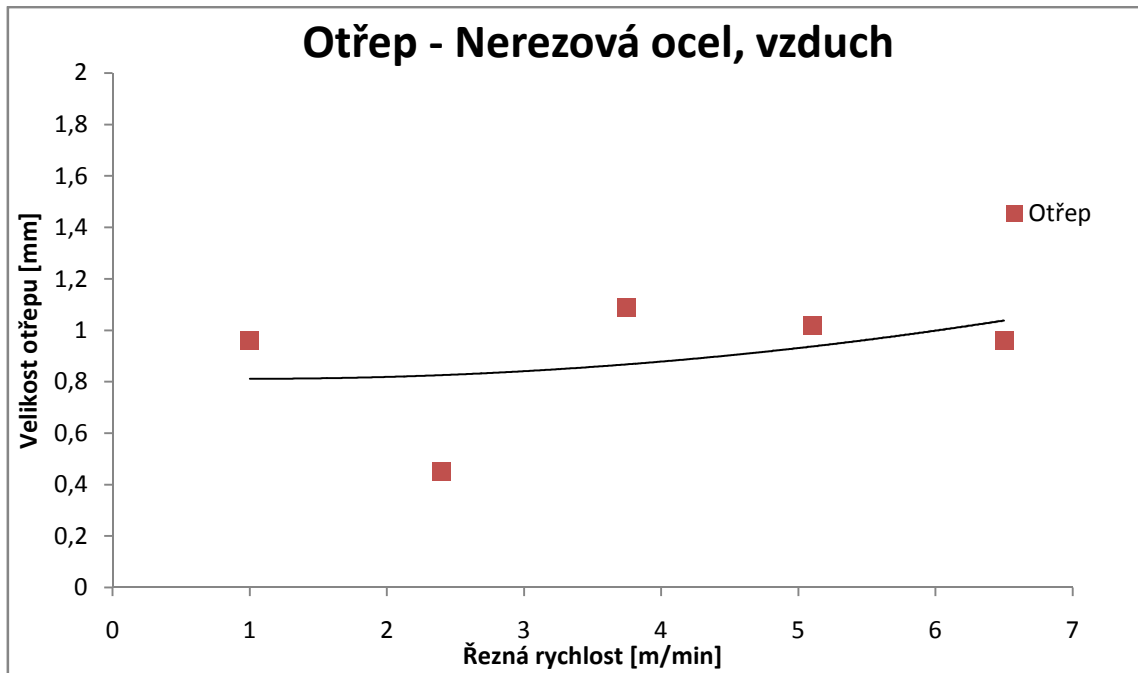
Na rozdíl od vzduchu dochází při snížení rychlosti k zlepšení jakosti povrchu, což je patrné i z pořizovaných snímků z digitální kamery. Vzhledem k velmi malému rozptylu lze prohlásit, že při rychlosti 2,1 m/min je dosaženo nejlepší drsnosti Rz5 29,8 μm . Od 2,1 m/min, ať už při snížení nebo zvýšení rychlosti, dochází k nárůstu hodnoty parametru Rz5.



Obrázek 34-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané dusíkem

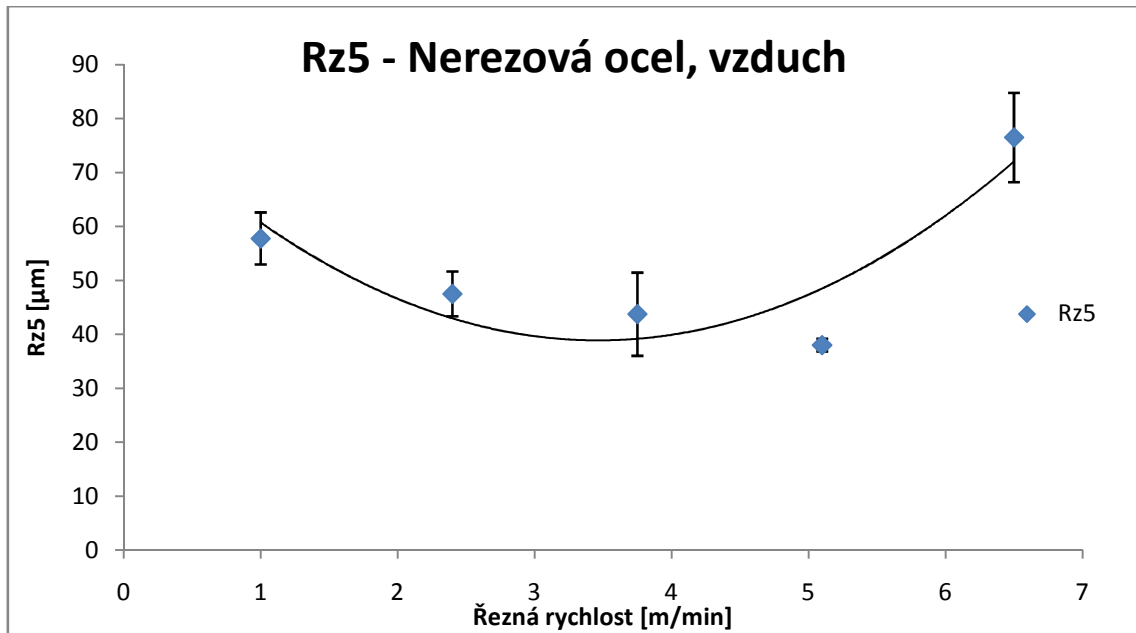
4.4. Hodnocení kvality řezu oceli X5CrNi18-10 řezané vzduchem

U nerezové oceli X5CrNi18-10, která byla řezána vzduchem, je nejmenší otřep o velikosti 0,45 mm naměřen při rychlosti 2,4 m/min, ale vyskytuje se po celém obvodu výpalku. U rychlosti 6,5 m/min je velikost otřepu 0,96 mm, vyskytuje se pouze při zpomalení stroje, například při najetí do radiusu, nebo změně směru řezání. U obou uvedených rychlostí lze otřep snadno odstranit například pilníkem. U ostatních rychlostí vzniká otřep odstranitelný broušením.



Obrázek 35-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané vzduchem

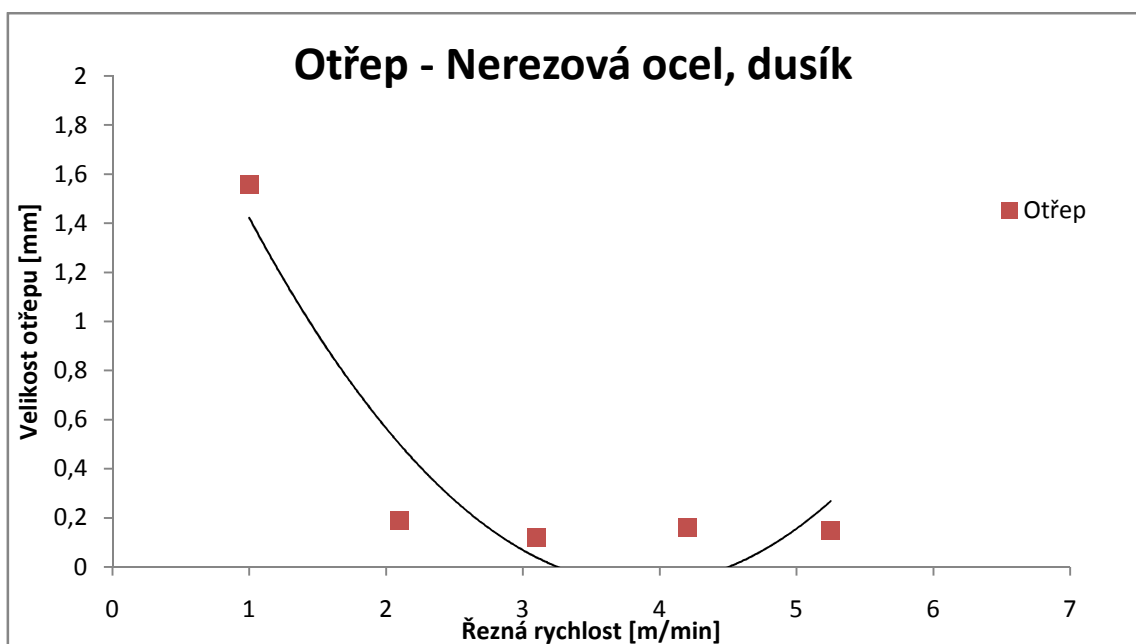
Z hlediska drsnosti je rychlost 5,1 m/min nejvhodnější, je při ní dosaženo Rz5 38,0 μm . Při zvětšení nebo zmenšení řezné rychlosti se jakost řezné hrany zhoršuje. Nejvyšší drsnost je 76,5 μm a to právě při nejvyšší použité rychlosti 6,5 m/min.



Obrázek 36-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané vzduchem

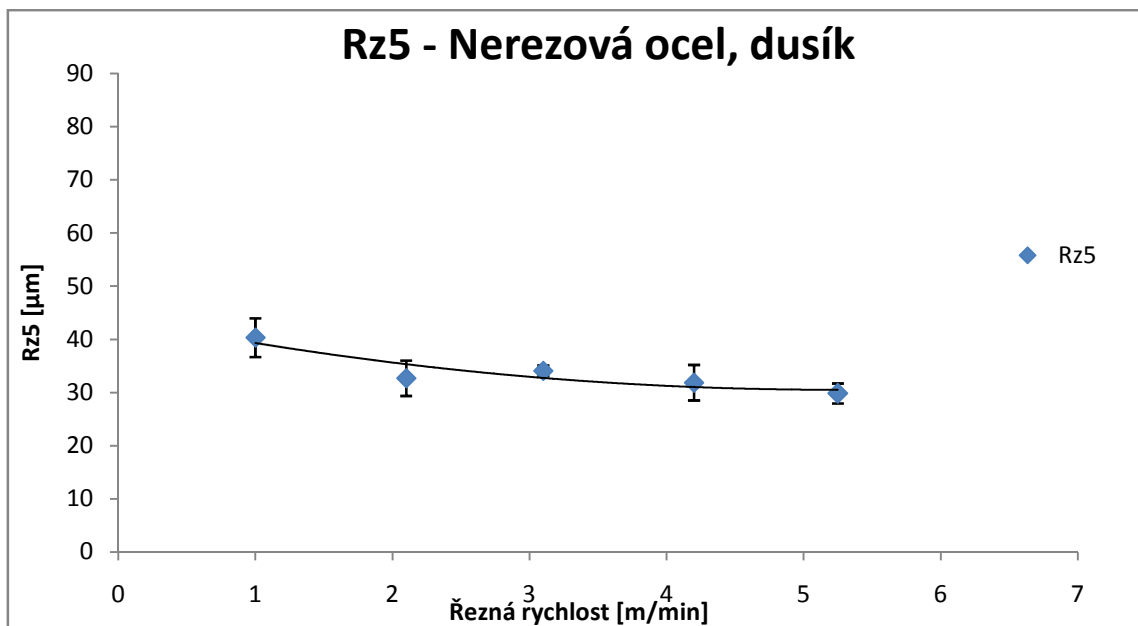
4.5. Hodnocení kvality řezu oceli X5CrNi18-10 řezané dusíkem

U řezání nerezové oceli dusíkem jsou naměřené hodnoty otřepu až do rychlosti 2,1 m/min v rozmezí od 0,12 mm do 0,19 mm. Otřepy jsou ve formě malých kuliček nahodile rozmístěných po výpalku a lze je snadno odstranit například drátěným kartáčem. Při zmenšení rychlosti pod 2,1 m/min dojde k velkému nárůstu otřepu a z minimálního nepatrného otřepu se stává velmi nevzhledný otřep, který se vyskytuje po celém obvodu výpalku a lze ho obtížně odstranit.



Obrázek 37-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané dusíkem

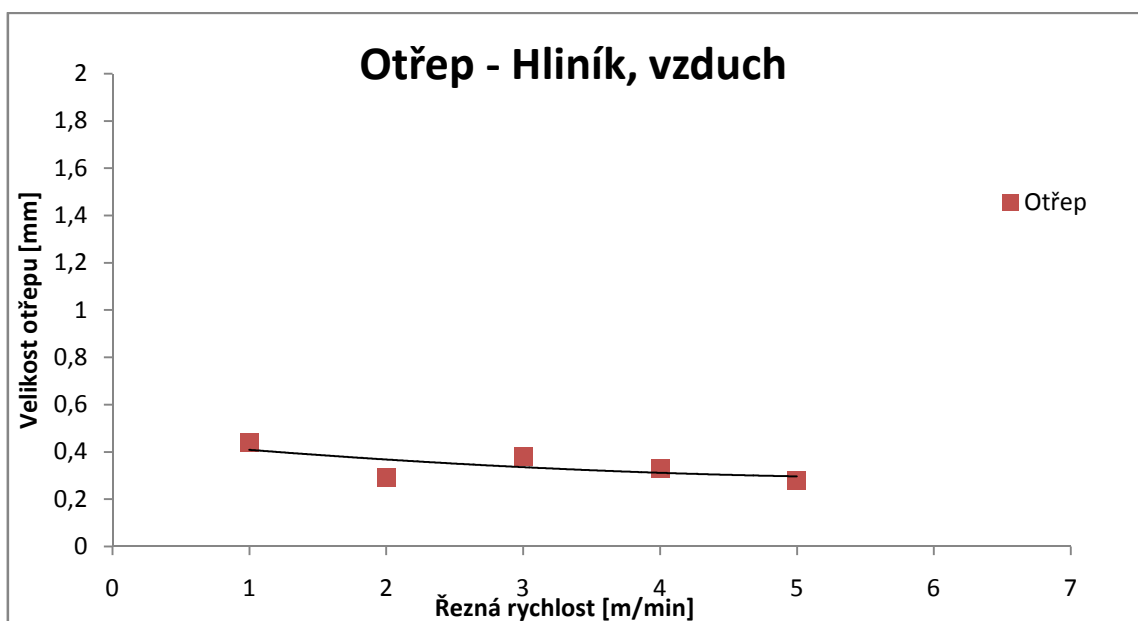
Drsnost se s klesající rychlostí zvětšuje, nicméně nedochází k velkým rozdílům. Nejmenší naměřená hodnota drsnosti je 29,8 μm a to při rychlosti 5,25 m/min. Nejvyšší hodnota parametru Rz5 je 40,3 μm a to při rychlosti 1 m/min.



Obrázek 38-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané dusíkem

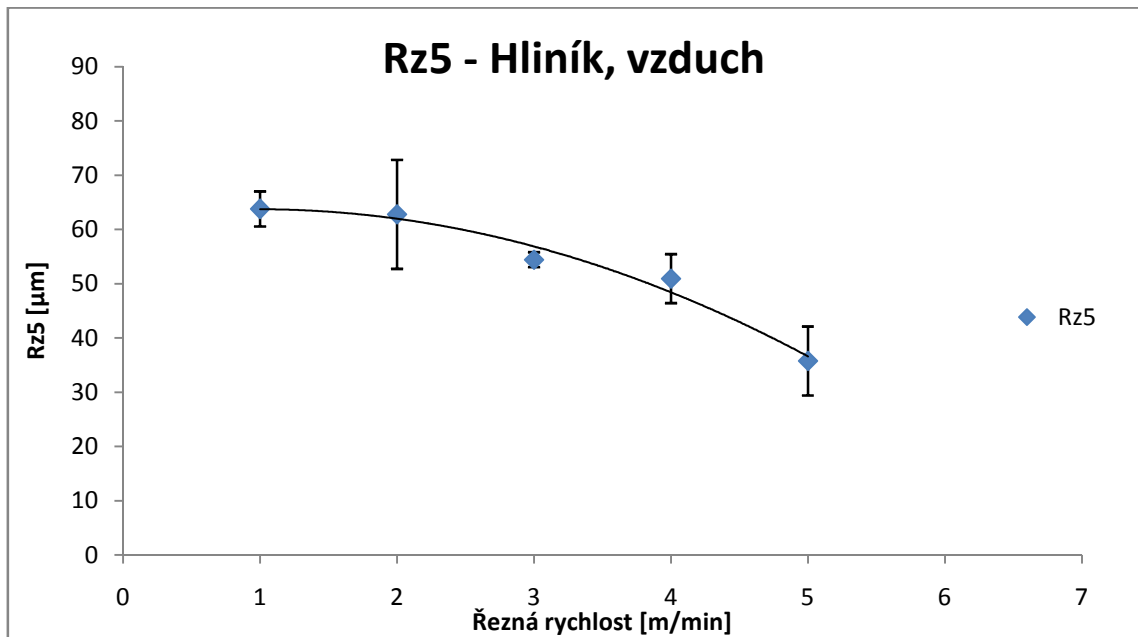
4.6. Hodnocení kvality řezu hliníku EN AW-1050A H24 řezaného vzduchem

Při řezání hliníku vzduchem dochází k téměř lineárnímu nárůstu velikosti otřepu s klesající rychlostí. Nejmenší jeho velikost je 0,28 mm při rychlosti 5 m/min. Otřepy lze odstranit pilováním, v sériové výrobě broušením.



Obrázek 39-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného vzduchem

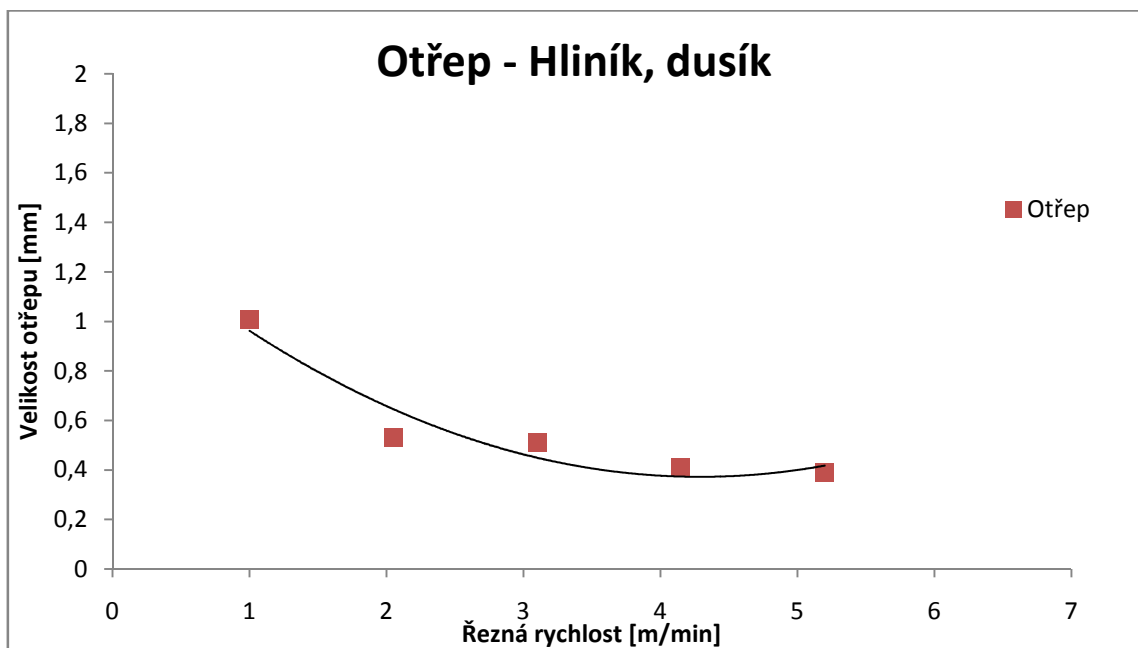
S klesající rychlostí také narůstá parametr Rz5. Nejlepší jakosti řezu bylo dosaženo při rychlosti 5 m/min.



Obrázek 40-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného vzduchem

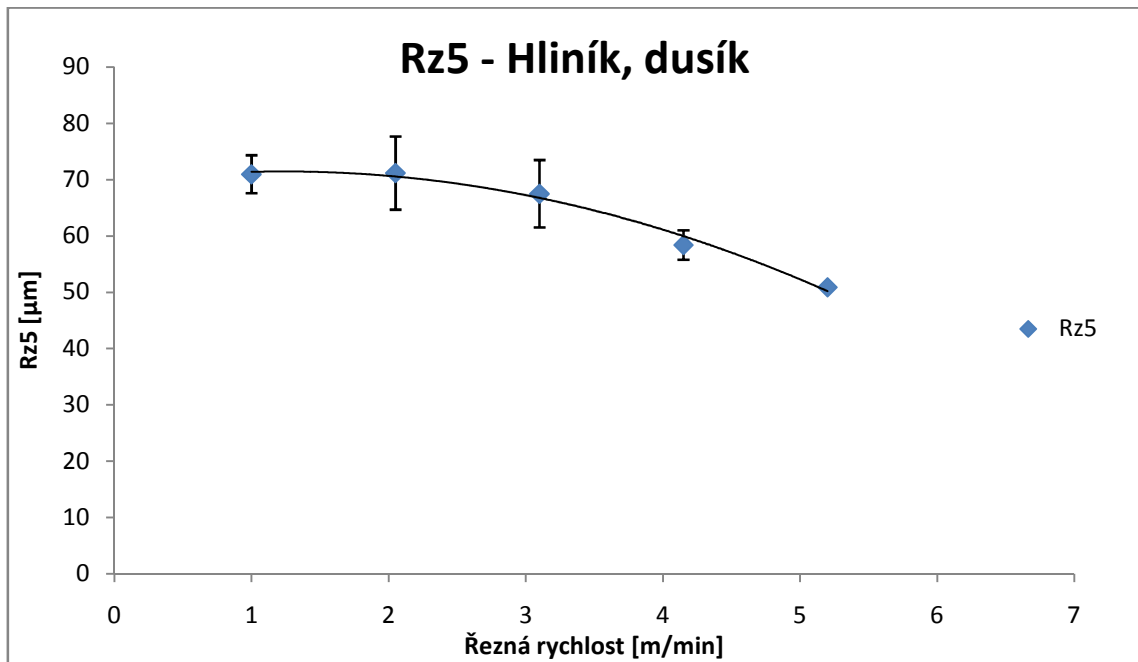
4.7. Hodnocení kvality řezu hliníku EN AW-1050A H24 řezaného dusíkem

Podobná závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti vzniká i u dusíku. S klesající rychlostí velikost otřepu narůstá. Nejmenší velikosti otřepu je dosaženo při rychlosti 5,2 m/min. Otřep je odstranitelný pilováním, či broušením.



Obrázek 41-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného dusíkem

Stejně tak vidíme podobnou závislost i u drsnosti. S klesající řeznou rychlostí se jakost řezu zhoršuje. Nejmenší hodnoty Rz5 je dosaženo při rychlosti 5,25 m/min.



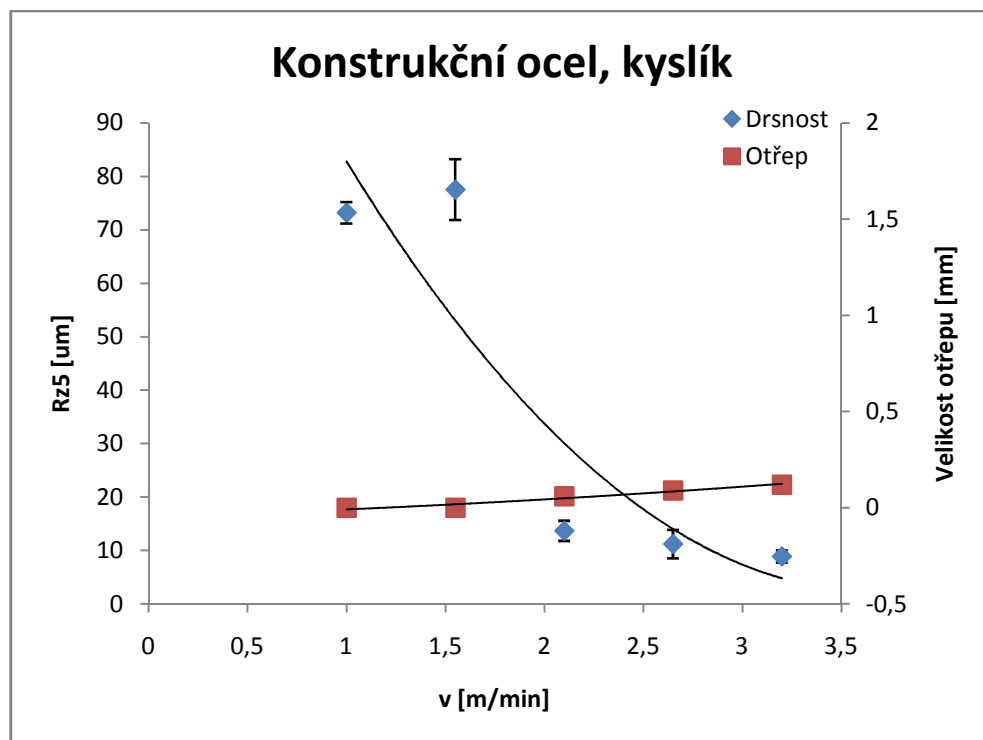
Obrázek 42-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného dusíkem

5. Závěr

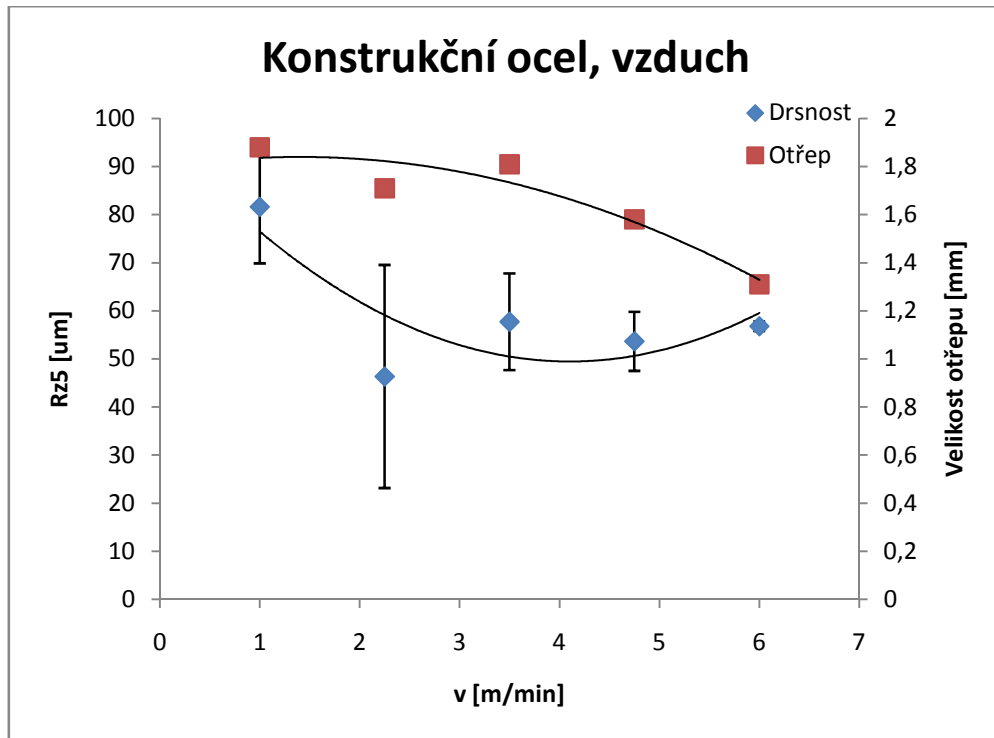
Tato bakalářská práce ve své teoretické části porovnává metody nekonvenčního dělení materiálu, popisuje princip laserů, jejich rozdělení a druhy. Dále pak uvádí základní přehled laserových technologií a blíže popisuje problematiku řezání. Experimentální část se zabývá vlivem řezné rychlosti na kvalitu řezu u vybraných materiálů, jimiž byly oceli S235JR, X5CrNi18-10 a hliník EN AW-1050A H24. Z těchto materiálů byla zhotovena sada vzorků, u kterých byla hodnocena velikost otřepu a parametr jakosti povrchu Rz5. Naměřená data byla zpracována do přehledných protokolů a zjištěné závislosti prezentovány formou grafu v kapitole Vyhodnocení. Zjištěné poznatky a závislosti budou využity při budoucím hledání optimálních řezných podmínek pro laserové specialisty z firmy Vanad 2000 a.s. Zadání bakalářské práce bylo tedy splněno.

Konstrukční ocel byla řezána za použití všech asistenčních plynů. Kyslíku, vzduchu i dusíku. Z přiložených grafů závislostí můžeme snadno vyčíst, že pro co nejkvalitnější řez, je nejvhodnější použít kyslík a snažit se dosáhnout co nejvyšší řezné rychlosti. Velikost otřepu je při takové rychlosti nejvyšší, nicméně se jedná o otřep, který se na výpalku vyskytuje zřídka a navíc je snadné ho odstranit.

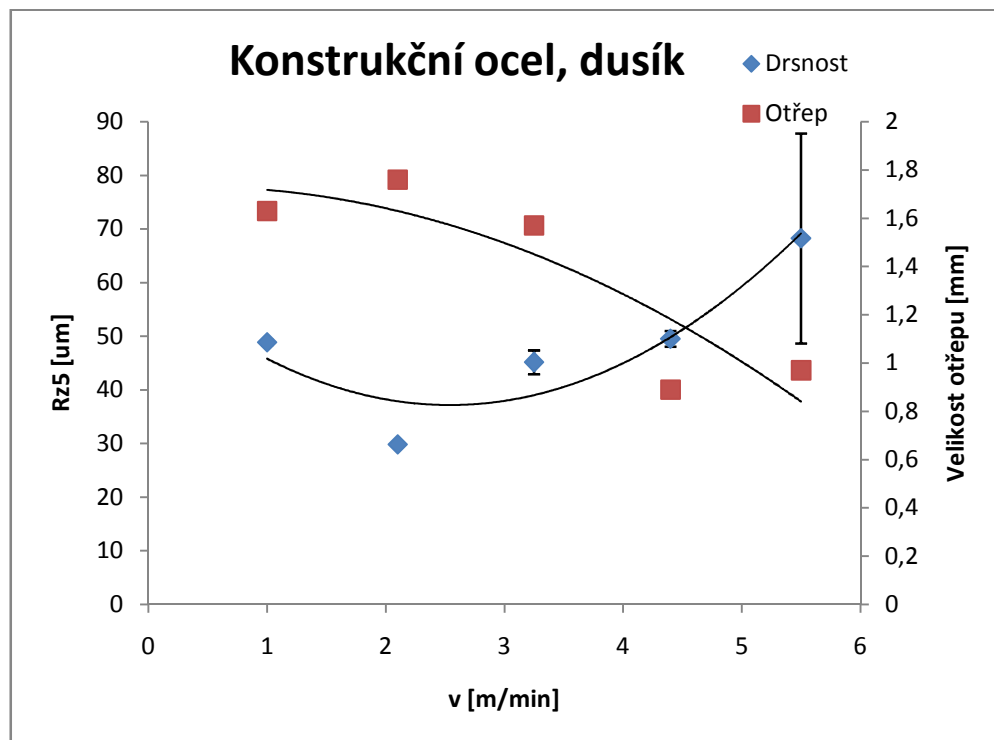
Při použití dusíku je dosahováno nepatrně lepší kvality řezu než při použití vzduchu. Nicméně řezání dusíkem se u konstrukčních ocelí používá jen výjimečně a to díky jeho vysoké ceně.



Obrázek 43-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané kyslíkem



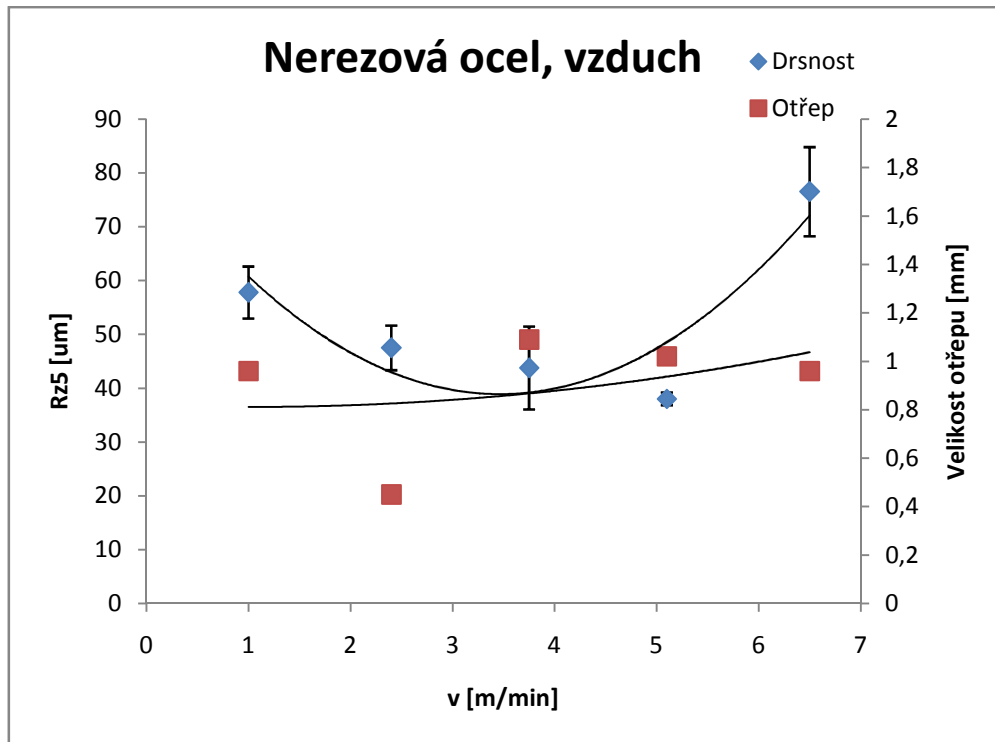
Obrázek 44-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané vzduchem



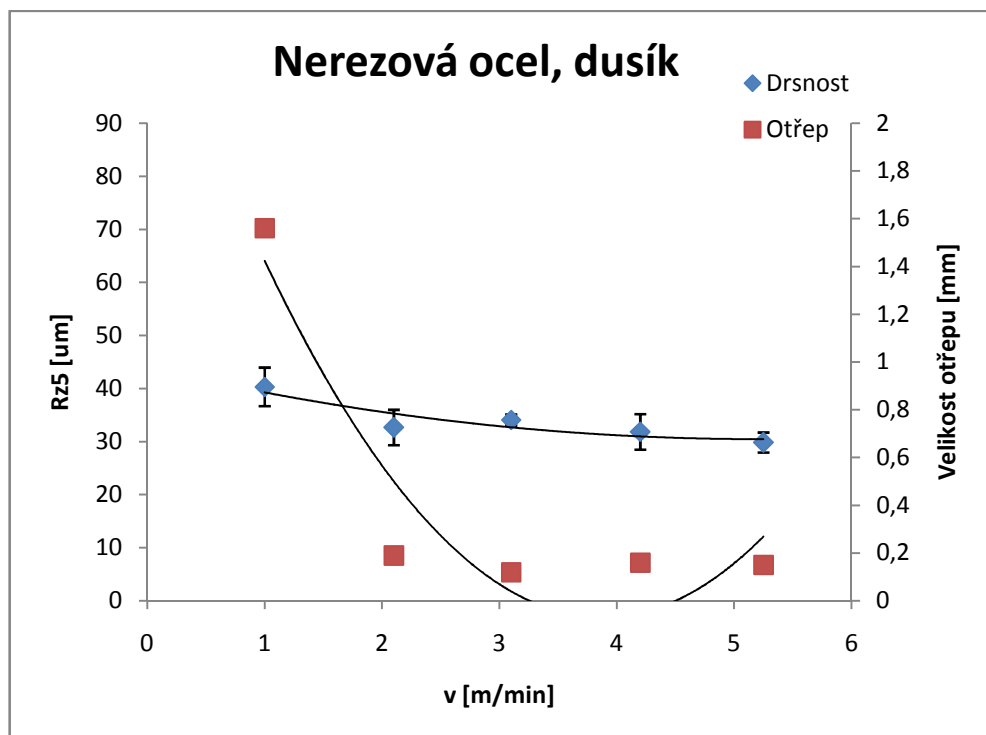
Obrázek 45-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané dusíkem

Při řezání nerezové oceli je naprosto nejvhodnějším asistenčním plynem dusík. Nejvhodnější řezná rychlost z hlediska velikosti otřepu i drsnosti je rychlost 5,25 m/min, při níž jsou dosahované hodnoty nejmenší. U vzduchu dochází ke zhoršení

kvality řezu. Řezná hrana je hrubší a taktéž velikost otřepu je mnohem větší. Pro řezání nerez se primárně využívá dusík. Pokud ale nezáleží na vzhledu řezné hrany a na velikosti otřepů, lze využít jako asistenční plyn vzduch, který je mnohem levnější.

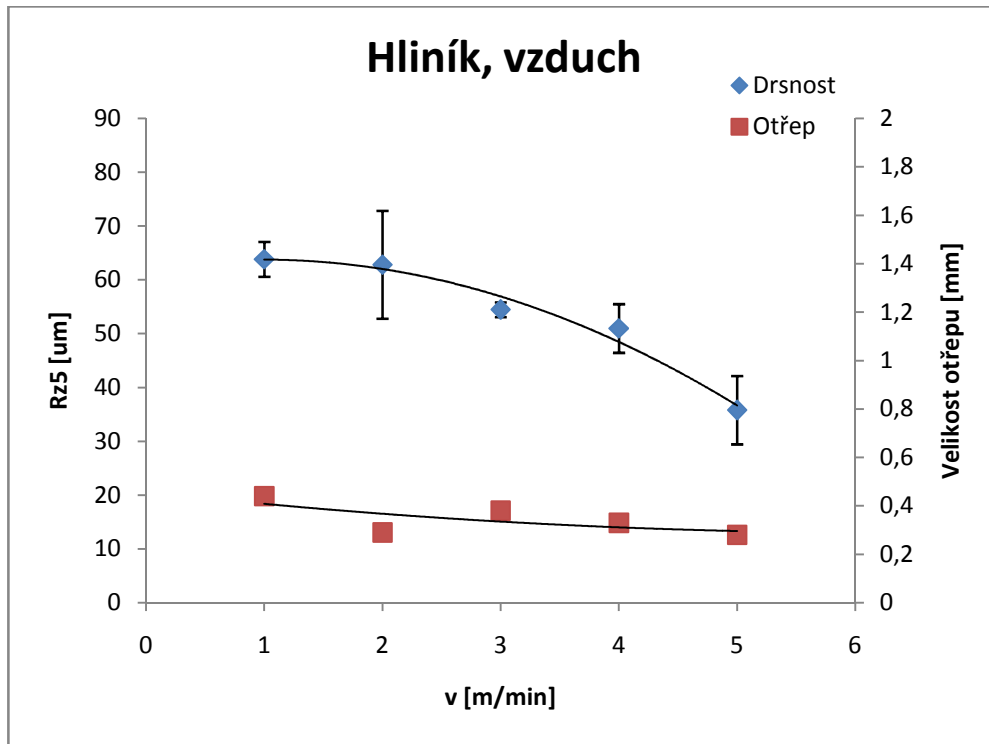


Obrázek 46-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané vzduchem

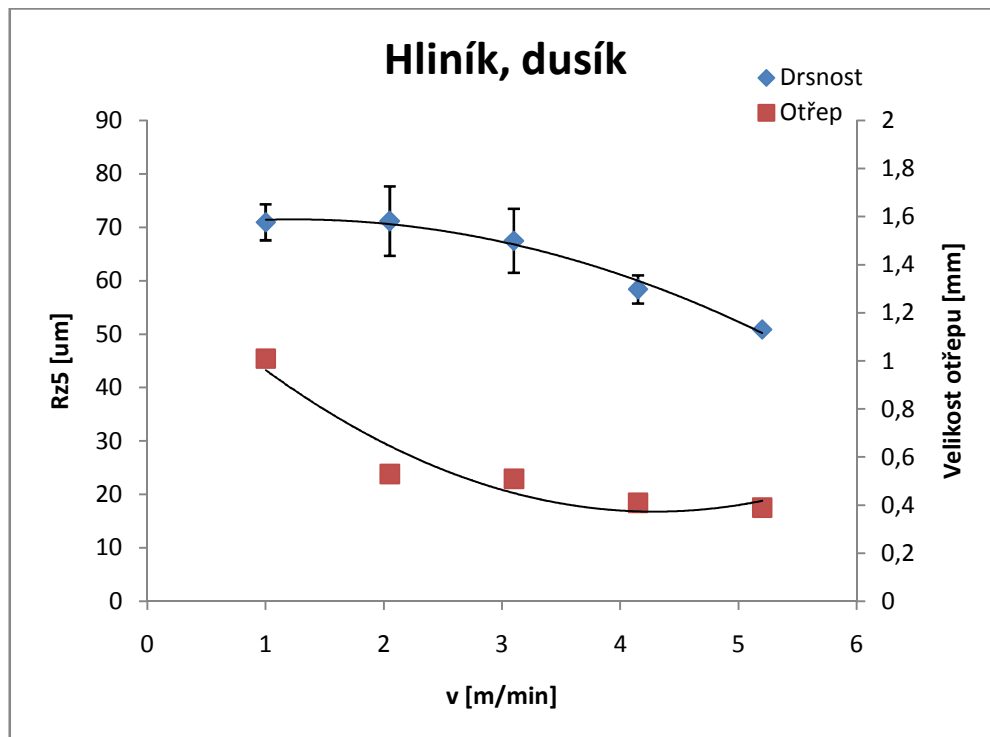


Obrázek 47-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané dusíkem

Zajímavým poznatkem je skutečnost, že u hliníku je dosahováno lepších hodnot při použití vzduchu. U vzduchu jsou menší hodnoty velikosti otřepu, tak i hodnoty drsností. Nejlepších řezů dosahujeme s maximální řeznou rychlostí. Pokud rychlost klesá, oba vyhodnocované parametry u obou použitých plynů se zhoršují.

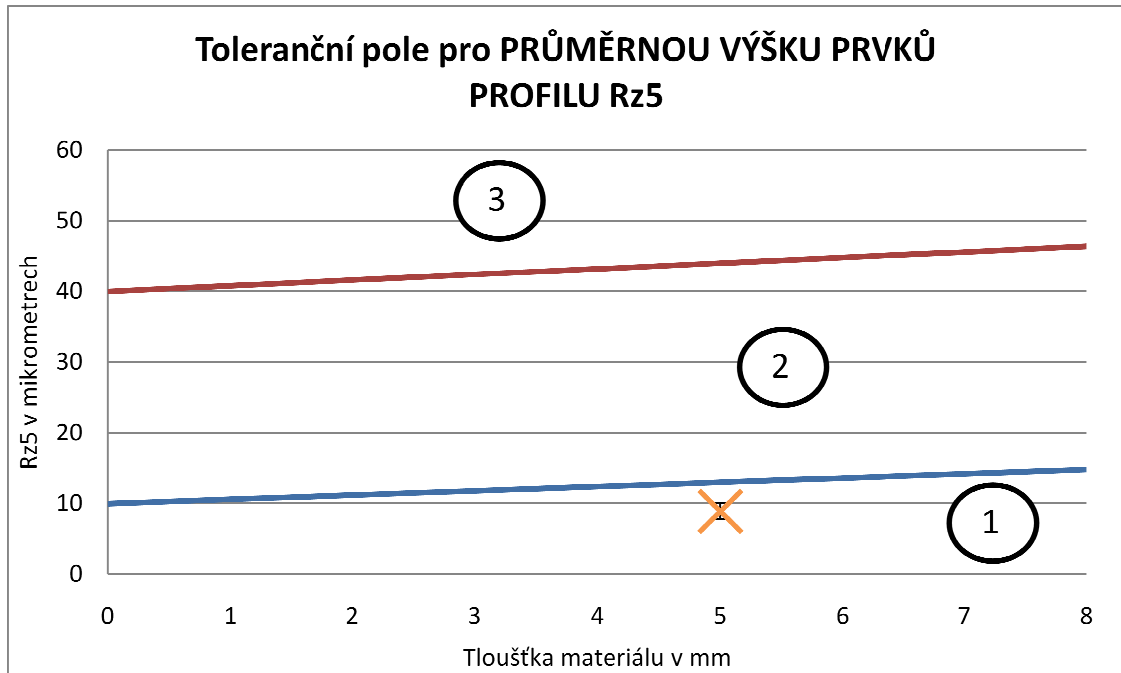


Obrázek 48-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného vzduchem



Obrázek 49-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného dusíkem

Úplným závěrem je uvedeno porovnání naměřené hodnoty Rz5 u oceli S235JR s typicky dosažitelnými hodnotami pro laserové řezání. Typicky dosažitelné hodnoty uvádí norma ISO 9013:2002 v grafu viz. Obrázek 23. Na svislé ose je vynesena parametr Rz5, na vodorovné ose tloušťka materiálu. Celá oblast grafu je rozdělena do 4 tříd, kde první třída dosahuje nejlepších parametrů a čtvrtá nejhorších. Naměřená hodnota parametru Rz5 u oceli S235JR je pro rychlost 3,2 m/min 8,9 μm , což odpovídá první třídě a naprosto vyhovuje uvedené normě.



Obrázek 50-Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu Rz5 pro vzorek z oceli S235JR řezaný kyslíkem rychlostí 3,2 m/min

Seznam použité literatury

- [1] CARISTAN, Charles L. Laser cutting guide for manufacturing. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, c2004. ISBN 0872636860.
- [2] DONG, Liang a Bryce SAMSON. Fiber Lasers: Basics, Technology, and Applications. CRC Press, 2016. ISBN 9781498725545 - CAT# K25782
- [3] BUCHFINK, Gabriela. The Laser As a Tool. Vogel Buchverlag Wurzburg, 2007. ISBN 978-3834330727
- [4] Laser. WikiSkripta. [online]. [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Laser>
- [5] Laser. Wikipedie. [online]. [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [6] Princip laseru. Lasery [online]. [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/princip.html>
- [7] Princip laseru. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
- [8] Součásti laseru. Lasery [online]. [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/soucasti.html>
- [9] Rozdělení laserů – LASCAM systems. LASCAM systems - průmyslové laserové a kamerové systémy [online]. Copyright © LASCAM systems s.r.o. [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [10] Typy laserů. Lasery [online]. [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/typy.html>
- [11] Typy laserů. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
- [12] Laserové technologie v praxi. | Portál moderní fyziky [online]. [cit. 2017-11-18]. Copyright © [cit. 21.06.2018]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [13] Tepelné zpracování laserem. Svařování [online]. [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/tepelne.htm>
- [14] Laserové povrchové kalení oceli - LaserTherm. Lasery pro průmyslové technologie, laserové systémy - LaserTherm [online]. Copyright © 2018 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-kaleni/>

- [15] Laserové kalení > LAO - lasery a optika. LAO - lasery a optika [online]. [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/povrchove-upravy-93/laserove-kaleni-94>
- [16] Laserové vrtání > LAO - lasery a optika. LAO - lasery a optika [online]. [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-vrtani-92>
- [17] Studijní podklady firmy VANAD 2000 a.s.
- [18] Mikroobrábění – Jak opracováváme miniaturní součásti laserem – LASCAM systems. LASCAM systems - průmyslové laserové a kamerové systémy[online]. Copyright © LASCAM systems s.r.o. [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/mikroobrabeni/>
- [19] Mikroobrábění. TRUMPF. [online]. Copyright © 2018 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/mikroobrabeni/
- [20] Leštění povrchu laserem. Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum [online]. Copyright © 2018 www.mmspektrum.com [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lesteni-povrchu-laserem.html>
- [21] Laserové čištění forem > LAO - lasery a optika. LAO - lasery a optika [online]. [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/povrchove-upravy-93/laserove-cistení-forem-245>
- [22] Lasery pro 3D tisk kovů – LASCAM systems. LASCAM systems - průmyslové laserové a kamerové systémy [online]. Copyright © LASCAM systems s.r.o. [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/3d-tisk-prototyping/>
- [23] Selective Laser Sintering – 3D-tisk.cz. 3D-tisk.cz – Aditivní výroba a rapid prototyping [online]. Copyright © 2012 [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [24] Svařování laserovým paprskem | TRUMPF. [online]. Copyright © 2018 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/
- [25] MRŇA, Libor. Moderní průmyslové lasery a související pokročilé technologie [přednáška]. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR. 7. 11. 2017. In. <https://www.youtube.com> [online]. [vid. 2017-11-09] Záznam dostupný z <https://www.youtube.com/watch?v=qE-kQxXOIh8&t=1140s>
- [26] YLS, 1-120 kW. IPG Photonics Corporation. [online]. Copyright © 2018, IPG Photonics Corporation All rights reserved. [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: [http://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers/1-micron-3/yls-1-100-kw#\[yls-up-to-500-kw](http://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers/1-micron-3/yls-1-100-kw#[yls-up-to-500-kw)

- [27] Laserové řezání > LAO - lasery a optika. LAO - lasery a optika [online]. [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-rezani-80>
- [28] Waterjet Cutting Technology for Manufacturing - Flow Waterjet [online]. [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.com/Learn/Comparative-Cutting.aspx#range>
- [29] Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení > LAO - lasery a optika. LAO - lasery a optika [online]. [cit. 2017-12-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [30] Tavné řezání. TRUMPF. [online]. Copyright © 2018 [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/tavne-rezani/
- [31] Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting) > LAO - lasery a optika. LAO - lasery a optika [online]. [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [32] Sublimační řezání. TRUMPF. [online]. Copyright © 2018 [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/sublimacni-rezani/
- [33] Řezání plamenem. TRUMPF. [online]. Copyright © 2018 [cit. 2017-12-21]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/rezani-plamenem/
- [34] Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu > LAO - lasery a optika. LAO - lasery a optika [online]. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [35] Řezání plazmou, plamenem | Svářecí technika Schinkmann.cz. Svářecí technika Schinkmann.cz [online]. Copyright © 1991 [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/rezani-plazmou-plamenem>
- [36] Comparison matrix of a few cutting methods including waterjet, wire EDM, Laser, and plasma. IWM Waterjet Cutting Machine and Water Jet Cutter Manufacturer [online]. Copyright © 2002 [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: http://www.iwmwaterjet.com/waterjet_EDM_laser_plasma.html
- [37] Advantages of Waterjet | Waterjet vs. Laser, CNC, Plasma, EDM, Stamping. Orange County Waterjet Services | California WaterJet Cutting [online]. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://www.milcowaterjet.com/advantages.php>
- [38] ResearchGate | Share and discover research [online]. [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/James_Wamai/publication/317429422_Heat_affected_zone_analysis_for_laser_and_micro-electrical_discharge_machined_nitinol/links/593a995ea6fdccea3b642846/Heat-affected-zone-analysis-for-laser-and-micro-electrical-discharge-machined-nitinol.pdf

- [39] Bystar L – Bystronic Czech Republic s.r.o.. www.bystronic.com [online]. Copyright © 2017 BYSTRONIC [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: https://www.bystronic.cz/cs/produkty/systemy_rezani_laserem/BystarL.php
- [40] Laserové a plazmové řezání. Doc. Ing. Ivo Hlavatý ,Ph.D. [online]. [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/16-17-83-84.pdf>
- [41] Průmyslové lasery (5) - Laserové řezání. Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum [online]. [cit. 2017-12-18]. Copyright © 2018 www.mmspektrum.com [cit. 21-06-2018]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>
- [42] X5CrNi18-10. Bolzano [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobyky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobyky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke>
- [43] Specifikace nerezových materiálů. Armat spol. s.r.o. [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <http://www.armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>
- [44] S235JR. Bolzano [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jrdrive-s235jrg2>
- [45] Ocelové plechy válcované za tepla. Nypro[online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <https://nyprohutni.cz/valcovane-za-tepla>
- [46] EN AW-1050 0 (A199,5 W7), EN AW – 1050A H14/H24 (A199,5 F11/G11). Hliníkové profily, hliníkové chladiče, hliníkové plechy - ALUCAD Bohemia, s. r. o. [online]. [cit. 2018-02-21]. Copyright © 2018 [cit. 21-06-2018]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-1050>
- [47] Hliníkové plechy | Kondor.cz. Hutní materiál, Kondor [online]. Copyright © 2013, KONDOR, s.r.o. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <https://www.kondor.cz/hlinikove-plechy/c-1502/>
- [48] Hliník A199,5 - ČSN 424005. Hliníkové profily, hliníkové plechy, hliníkové systémy | NPS PROAL Ostrava [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424005.htm>
- [49] Datový list Kyslík 3.5. The Linde Group [online]. [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: https://www.linde-onlineshop.cz/wcsstore/CZ_Linde_CatalogAssetStore/Attachment/DL/Datov%C3%BD%20list%20Kysl%C3%ADk%203.5.pdf

- [50] Datový list Dusík 5.0. The Linde Group [online]. [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: https://www.linde-onlineshop.cz/wcsstore/CZ_Linde_CatalogAssetStore/Attachment/DL/Datov%C3%BD%20list%20Dus%C3%ADk%205.0.pdf
- [51] Laserové navařování - LaserTherm. Lasery pro průmyslové technologie, laserové systémy - LaserTherm [online]. Copyright © 2018 [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-navarovani/>
- [52] Laserové navařování - KSK Precise Motion, a.s.. KSK Precise Motion, a.s.[online]. Copyright © [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: <http://www.ksk-pm.cz/laserove-navarovani/>
- [53] ISO 9013:2002. Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2003.
- [54] MarSurf XCR 20 - Měřicí technika pro výrobu Mahr. Home - Mahr Metrology[online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.mahr.com/cs/Produkty-a-slu%C5%BEby/V%C3%BDrobn%C3%AD-m%C4%9B%C5%99ic%C3%AD-technika/Produkty/MarSurf---P%C5%99%C3%ADstroje-na-m%C4%9B%C5%99en%C3%AD-kontury/MarSurf-XCR-20/>
- [55] Vzduch – Wikipedie. [online]. [cit. 2018-06-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vzduch>
- [56] O firmě. Vanad a.s. [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <http://www.vanad.cz/o-firme>

Seznam obrázků

Obrázek 1-Řez plasmou[28]	10
Obrázek 2-Řez plamenem [17]	11
Obrázek 3-Řez WJ [28]	12
Obrázek 4-Řez EDM [28].....	13
Obrázek 5-Rozsah řezných rychlostí [28]	14
Obrázek 6-Stimulovaná emise [29]	15
Obrázek 7-Vznik laserového svazku v rezonátoru [29].....	16
Obrázek 8-Konstrukce laseru [4].....	16
Obrázek 9-Gravírování a značení [12].....	19
Obrázek 10-Kalení ozubení [12].....	20
Obrázek 11-Mikroobrábění [18].....	20
Obrázek 12-Selectiv laser sintering [22]	21
Obrázek 13-Svařování laserovým paprskem [24]	22
Obrázek 14-Schéma laserového řezání [31]	23
Obrázek 15-Porovnání řezných rychlostí v závislosti na tloušťce materiálu [31].....	24
Obrázek 16-Absorpce kovů [41].....	25
Obrázek 17-Schéma LPSS Nd:YAG [34]	26
Obrázek 18-Schéma DPSS Nd:YAG [34].....	27
Obrázek 19-Diskový laser [34].....	27
Obrázek 20-Schéma vláknového laseru [34]	28
Obrázek 21-Schéma difúzně chlazeného RF buzeného CO ₂ laseru [34].....	29
Obrázek 22-Měření velikosti otřepu digitální mikroskopovou kamerou.....	32
Obrázek 23-Typicky dosažitelné hodnoty průměrné výšky prvků profilu, Rz5[53].....	32
Obrázek 24-Průměrná výška prvků profilu [53].....	33
Obrázek 25-WRYKRYŠ - hlavní plocha.....	34
Obrázek 26-Vanad KOMPKT Laser se zdrojem IPG a hlavou Precitec	34
Obrázek 27-Digitální mikroskopová kamera.....	35
Obrázek 28-MarSurf XCR 20.....	36
Obrázek 29-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané kyslíkem.....	40
Obrázek 30-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané kyslíkem	41

Obrázek 31-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané vzduchem	41
Obrázek 32-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané vzduchem.....	42
Obrázek 33-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané dusíkem	43
Obrázek 34-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané dusíkem.....	43
Obrázek 35-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané vzduchem	44
Obrázek 36-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané vzduchem	45
Obrázek 37-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané dusíkem.....	45
Obrázek 38-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané dusíkem	46
Obrázek 39-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného vzduchem.....	46
Obrázek 40-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného vzduchem.....	47
Obrázek 41-Závislost velikosti otřepu na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného dusíkem	47
Obrázek 42-Závislost drsnosti na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného dusíkem	48
Obrázek 43-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané kyslíkem.....	49
Obrázek 44-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané vzduchem	50
Obrázek 45-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u oceli S235JR řezané dusíkem.....	50
Obrázek 46-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané vzduchem.....	51
Obrázek 47-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u oceli X5CrNi18-10 řezané dusíkem	51
Obrázek 48-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného vzduchem.....	52
Obrázek 49-Závislosti parametrů kvality řezu na řezné rychlosti u hliníku EN AW-1050A H24 řezaného dusíkem.....	52
Obrázek 50-Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu Rz5 pro vzorek z oceli S235JR řezaný kyslíkem rychlostí 3,2 m/min	53

Seznam tabulek

Tabulka 1-Porovnání uvedených metod řezání	14
Tabulka 2-Použití asistenčních plynů v závislosti na použitém materiálu	30
Tabulka 3-Použité řezné rychlosti pro konstrukční ocel	30
Tabulka 4-Použité řezné rychlosti pro nerezovou ocel a hliník.....	31
Tabulka 5-Cena řezu při řezání rychlostí $v = 5,25$ m/s.....	31
Tabulka 6-Cena řezu při řezání rychlostí $v = 1$ m/s.....	31
Tabulka 7-Parametry stroje Vanad KOMPAKT Laser.....	35
Tabulka 8-Parametry zdroje IPG	35
Tabulka 9-Parametry mikroskopové kamery.....	36
Tabulka 10-Technické parametry profiloměru	37
Tabulka 11-Chemické složení oceli S235JR v %	37
Tabulka 12-Mechanické vlastnosti oceli S235JR.....	37
Tabulka 13-Chemické složení oceli X5CrNi18-10 v %	38
Tabulka 14-Mechanické vlastnosti oceli X5CrNi18-10	38
Tabulka 15-Chemické složení hliníku EN AW-1050A H24	38
Tabulka 16-Mechanické vlastnosti hliníku EN AW-1050A H24.....	38
Tabulka 17-Složení kyslíku 3.5	39
Tabulka 18-Složení dusíku 5.0	39
Tabulka 19-Složení vzduchu	39

Seznam textových příloh

- Příloha číslo 1: Vzorky z konstrukční oceli S235JR řezané kyslíkem
- Příloha číslo 2: Vzorky z konstrukční oceli S235JR řezané vzduchem
- Příloha číslo 3: Vzorky z konstrukční oceli S235JR řezané dusíkem
- Příloha číslo 4: Vzorky z nerezové oceli X5CrNi18-10 řezané vzduchem
- Příloha číslo 5: Vzorky z nerezové oceli X5CrNi18-10 řezané dusíkem
- Příloha číslo 6: Vzorky z hliníku EN AW-1050A H24 řezané vzduchem
- Příloha číslo 7: Vzorky z hliníku EN AW-1050A H24 řezané dusíkem
- Příloha číslo 8: Kalibrační protokol Mahr
- Příloha číslo 9: Příklad protokolu z měření drsnosti

Seznam elektronických příloh

- Příloha číslo 1: Bakalářská práce_Jakub Petrus.pdf
- Příloha číslo 2: 1_kalibrace.pdf
- Příloha číslo 3: AL_AIR_1,00.pdf
- Příloha číslo 4: AL_AIR_2,00.pdf
- Příloha číslo 5: AL_AIR_3,00.pdf
- Příloha číslo 6: AL_AIR_4,00.pdf
- Příloha číslo 7: AL_AIR_5,00.pdf
- Příloha číslo 8: AL_N2_1,00.pdf
- Příloha číslo 9: AL_N2_2,05.pdf
- Příloha číslo 10: AL_N2_3,10.pdf
- Příloha číslo 11: AL_N2_4,15.pdf
- Příloha číslo 12: AL_N2_5,20.pdf
- Příloha číslo 13: MS_AIR_1,00.pdf
- Příloha číslo 14: MS_AIR_2,25.pdf
- Příloha číslo 15: MS_AIR_3,5.pdf
- Příloha číslo 16: MS_AIR_4,75.pdf
- Příloha číslo 17: MS_AIR_6,00.pdf
- Příloha číslo 18: MS_N2_1,00.pdf
- Příloha číslo 19: MS_N2_2,1.pdf
- Příloha číslo 20: MS_N2_3,25.pdf
- Příloha číslo 21: MS_N2_4,4.pdf
- Příloha číslo 22: MS_N2_5,5.pdf
- Příloha číslo 23: MS_O2_1,00.pdf

- Příloha číslo 24: MS_O2_1,55.pdf
- Příloha číslo 25: MS_O2_2,1.pdf
- Příloha číslo 26: MS_O2_2,65.pdf
- Příloha číslo 27: MS_O2_3,2.pdf
- Příloha číslo 28: SS_AIR_1,00.pdf
- Příloha číslo 29: SS_AIR_2,4.pdf
- Příloha číslo 30: SS_AIR_3,75.pdf
- Příloha číslo 31: SS_AIR_5,1.pdf
- Příloha číslo 32: SS_AIR_6,5.pdf
- Příloha číslo 33: SS_N2_1,00.pdf
- Příloha číslo 34: SS_N2_2,1.pdf
- Příloha číslo 35: SS_N2_3,1.pdf
- Příloha číslo 36: SS_N2_4,2.pdf
- Příloha číslo 37: SS_N2_5,25.pdf

Příloha číslo 1




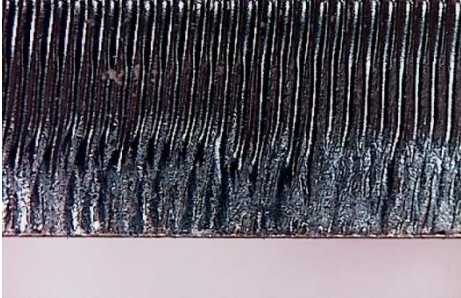
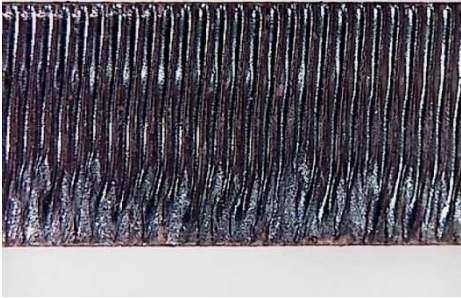
Vzorky z konstrukční oceli S235JR řezané kyslíkem



Vzorky z oceli S235JR řezané kyslíkem

Technologické parametry pro řezání oceli S235JR kyslíkem

Výkon laseru	[W]	4000
Rychlost řezu	[m/min]	3,20
Řezací tlak	[bar]	0,7
Ø trysky	[mm]	D1,5-duální
Poloha ohniska	[mm]	3,50

 <p><i>MS+O₂, v = 3,20 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+O₂, v = 3,20 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 264 1295 443"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">3,20</td> <td rowspan="3">0,12</td> <td>10,2</td> <td rowspan="3">8,9</td> </tr> <tr> <td>8,2</td> </tr> <tr> <td>8,3</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep snadno odstranitelný; ve formě kuliček; velmi nízký výskyt</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	3,20	0,12	10,2	8,9	8,2	8,3
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
3,20	0,12	10,2	8,9								
		8,2									
		8,3									
 <p><i>MS+O₂, v = 2,65 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+O₂, v = 2,65 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 636 1295 815"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">2,65</td> <td rowspan="3">0,09</td> <td>10,3</td> <td rowspan="3">11,2</td> </tr> <tr> <td>9,2</td> </tr> <tr> <td>14,2</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep snadno odstranitelný; ve formě kuliček; velmi nízký výskyt</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	2,65	0,09	10,3	11,2	9,2	14,2
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
2,65	0,09	10,3	11,2								
		9,2									
		14,2									
 <p><i>MS+O₂, v = 2,10 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+O₂, v = 2,10 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1008 1295 1187"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">2,10</td> <td rowspan="3">0,06</td> <td>11,6</td> <td rowspan="3">13,7</td> </tr> <tr> <td>15,2</td> </tr> <tr> <td>14,3</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep snadno odstranitelný; ve formě kuliček; velmi nízký výskyt</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	2,10	0,06	11,6	13,7	15,2	14,3
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
2,10	0,06	11,6	13,7								
		15,2									
		14,3									
 <p><i>MS+O₂, v = 1,55 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+O₂, v = 1,55 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1402 1295 1581"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1,55</td> <td rowspan="3">0,00</td> <td>72,7</td> <td rowspan="3">77,5</td> </tr> <tr> <td>76,2</td> </tr> <tr> <td>83,8</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Bez otřepu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	1,55	0,00	72,7	77,5	76,2	83,8
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
1,55	0,00	72,7	77,5								
		76,2									
		83,8									
 <p><i>MS+O₂, v = 1,00 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+O₂, v = 1,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1774 1295 1953"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1,00</td> <td rowspan="3">0,00</td> <td>75,5</td> <td rowspan="3">73,2</td> </tr> <tr> <td>72,1</td> </tr> <tr> <td>72,0</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Bez otřepu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	1,00	0,00	75,5	73,2	72,1	72,0
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
1,00	0,00	75,5	73,2								
		72,1									
		72,0									

Příloha číslo 2


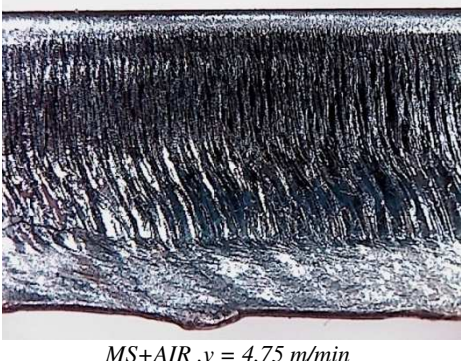
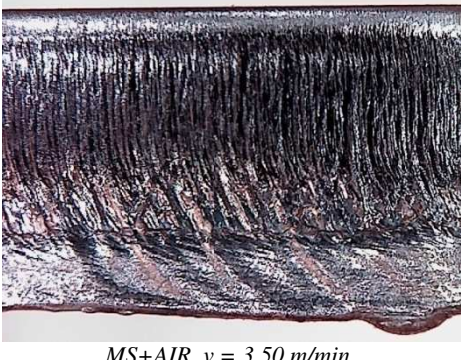
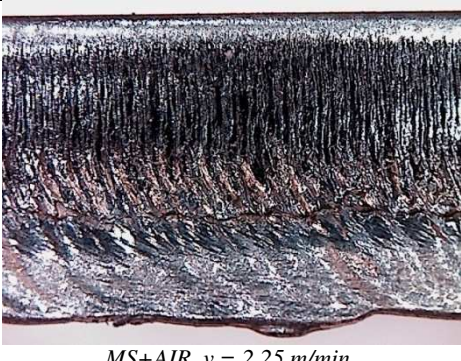

Vzorky z konstrukční oceli S235JR řezané vzduchem



Vzorky z oceli S235JR řezané vzduchem

Technologické parametry pro řezání oceli S235JR vzduchem

Výkon laseru	[W]	4000
Rychlost řezu	[m/min]	6,00
Řezací tlak	[bar]	12,5
Ø trysky	[mm]	1,5
Poloha ohniska	[mm]	-2,00

 <p><i>MS+AIR ,v = 6,00 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+AIR ,v = 6,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="754 248 1297 427"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">6,00</td> <td rowspan="3">1,31</td> <td>57,6</td> <td rowspan="3">56,8</td> </tr> <tr> <td>57,1</td> </tr> <tr> <td>55,7</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; ve formě kapek a v souvislé vrstvě (při zpomalení); výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	6,00	1,31	57,6	56,8	57,1	55,7
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
6,00	1,31	57,6	56,8								
		57,1									
		55,7									
 <p><i>MS+AIR ,v = 4,75 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+AIR ,v = 4,75 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="754 640 1297 819"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">4,75</td> <td rowspan="3">1,58</td> <td>50,5</td> <td rowspan="3">53,7</td> </tr> <tr> <td>49,7</td> </tr> <tr> <td>60,7</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	4,75	1,58	50,5	53,7	49,7	60,7
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
4,75	1,58	50,5	53,7								
		49,7									
		60,7									
 <p><i>MS+AIR ,v = 3,50 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+AIR ,v = 3,50 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="754 1010 1297 1189"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">3,50</td> <td rowspan="3">1,81</td> <td>52,0</td> <td rowspan="3">57,7</td> </tr> <tr> <td>69,3</td> </tr> <tr> <td>51,9</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	3,50	1,81	52,0	57,7	69,3	51,9
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
3,50	1,81	52,0	57,7								
		69,3									
		51,9									
 <p><i>MS+AIR ,v = 2,25 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+AIR ,v = 2,25 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="754 1379 1297 1559"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">2,25</td> <td rowspan="3">1,71</td> <td>41,90</td> <td rowspan="3">46,4</td> </tr> <tr> <td>25,8</td> </tr> <tr> <td>71,5</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	2,25	1,71	41,90	46,4	25,8	71,5
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
2,25	1,71	41,90	46,4								
		25,8									
		71,5									
 <p><i>MS+AIR ,v = 1,00 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+AIR ,v = 1,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="754 1749 1297 1928"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1,00</td> <td rowspan="3">1,88</td> <td>79,7</td> <td rowspan="3">81,6</td> </tr> <tr> <td>70,9</td> </tr> <tr> <td>94,2</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	1,00	1,88	79,7	81,6	70,9	94,2
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
1,00	1,88	79,7	81,6								
		70,9									
		94,2									

Příloha číslo 3

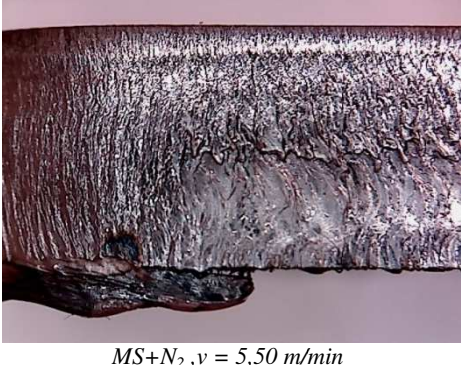
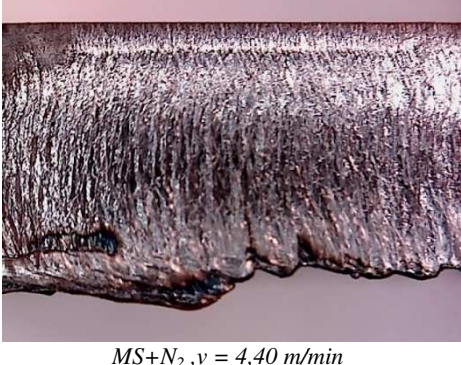
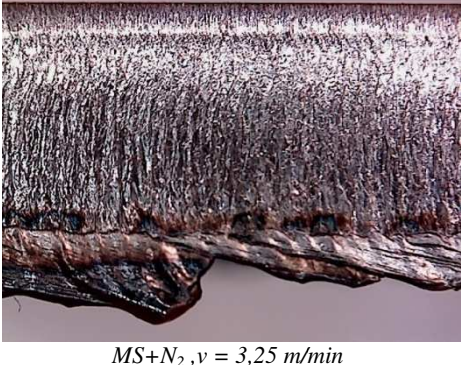
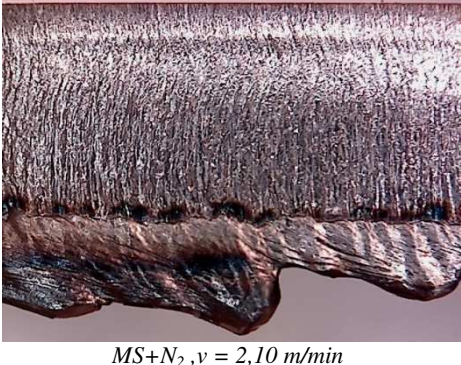
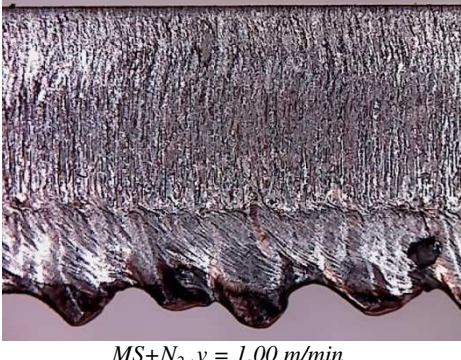
Vzorky z konstrukční oceli S235JR řezané dusíkem



Vzorky z oceli S235JR řezané dusíkem

Technologické parametry pro řezání oceli S235JR dusíkem

Výkon laseru	[W]	4000
Rychlost řezu	[m/min]	5,50
Řezací tlak	[bar]	20
Ø trysky	[mm]	1,5
Poloha ohniska	[mm]	-2,30

 <p style="text-align: center;"><i>MS+N₂, v = 5,50 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+N₂, v = 5,50 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 250 1295 430"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">5,50</td> <td rowspan="3">0,97</td> <td>90,4</td> <td rowspan="3">68,2</td> </tr> <tr> <td>53,3</td> </tr> <tr> <td>61,0</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; ve formě kapek a v souvislé vrstvě (při zpomalení); výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	5,50	0,97	90,4	68,2	53,3	61,0
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
5,50	0,97	90,4	68,2								
		53,3									
		61,0									
 <p style="text-align: center;"><i>MS+N₂, v = 4,40 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+N₂, v = 4,40 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 645 1295 824"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">4,40</td> <td rowspan="3">0,89</td> <td>51,0</td> <td rowspan="3">49,5</td> </tr> <tr> <td>49,5</td> </tr> <tr> <td>48,1</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	4,40	0,89	51,0	49,5	49,5	48,1
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
4,40	0,89	51,0	49,5								
		49,5									
		48,1									
 <p style="text-align: center;"><i>MS+N₂, v = 3,25 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+N₂, v = 3,25 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1016 1295 1196"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">3,25</td> <td rowspan="3">1,57</td> <td>43,3</td> <td rowspan="3">45,1</td> </tr> <tr> <td>47,6</td> </tr> <tr> <td>44,5</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	3,25	1,57	43,3	45,1	47,6	44,5
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
3,25	1,57	43,3	45,1								
		47,6									
		44,5									
 <p style="text-align: center;"><i>MS+N₂, v = 2,10 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+N₂, v = 2,10 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1388 1295 1568"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">2,10</td> <td rowspan="3">1,76</td> <td>29,5</td> <td rowspan="3">29,8</td> </tr> <tr> <td>29,7</td> </tr> <tr> <td>30,2</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	2,10	1,76	29,5	29,8	29,7	30,2
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
2,10	1,76	29,5	29,8								
		29,7									
		30,2									
 <p style="text-align: center;"><i>MS+N₂, v = 1,00 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>MS+N₂, v = 1,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1760 1295 1939"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1,00</td> <td rowspan="3">1,63</td> <td>49,1</td> <td rowspan="3">48,9</td> </tr> <tr> <td>49,1</td> </tr> <tr> <td>48,3</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	1,00	1,63	49,1	48,9	49,1	48,3
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
1,00	1,63	49,1	48,9								
		49,1									
		48,3									

Příloha číslo 4






Vzorky z nerezové oceli X5CrNi18-10 řezané vzduchem



Vzorky z oceli X5CrNi18-10 řezané vzduchem

Technologické parametry pro řezání oceli X5CrNi18-10 vzduchem

Výkon laseru	[W]	4000
Rychlost řezu	[m/min]	6,50
Řezací tlak	[bar]	12,5
Ø trysky	[mm]	1,5
Poloha ohniska	[mm]	-3,00

 <p style="text-align: center;"><i>SS+AIR, v = 6,50 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>SS+AIR, v = 6,50 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 264 1295 443"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">6,50</td> <td rowspan="3">0,96</td> <td>83,3</td> <td rowspan="3">76,5</td> </tr> <tr> <td>78,9</td> </tr> <tr> <td>67,3</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep hůře odstranitelný; ve formě krápníků; výskyt při zpomalení</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	6,50	0,96	83,3	76,5	78,9	67,3
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
6,50	0,96	83,3	76,5								
		78,9									
		67,3									
 <p style="text-align: center;"><i>SS+AIR, v = 5,10 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>SS+AIR, v = 5,10 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 636 1295 815"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">5,10</td> <td rowspan="3">1,02</td> <td>37,1</td> <td rowspan="3">38,0</td> </tr> <tr> <td>37,7</td> </tr> <tr> <td>39,3</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; ve formě krápníků; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	5,10	1,02	37,1	38,0	37,7	39,3
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
5,10	1,02	37,1	38,0								
		37,7									
		39,3									
 <p style="text-align: center;"><i>SS+AIR, v = 3,75 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>SS+AIR, v = 3,75 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1008 1295 1187"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">3,75</td> <td rowspan="3">1,09</td> <td>41,6</td> <td rowspan="3">43,8</td> </tr> <tr> <td>52,3</td> </tr> <tr> <td>37,3</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; ve formě krápníků; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	3,75	1,09	41,6	43,8	52,3	37,3
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
3,75	1,09	41,6	43,8								
		52,3									
		37,3									
 <p style="text-align: center;"><i>SS+AIR, v = 2,40 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>SS+AIR, v = 2,40 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1379 1295 1559"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">2,40</td> <td rowspan="3">0,45</td> <td>43,2</td> <td rowspan="3">47,5</td> </tr> <tr> <td>47,8</td> </tr> <tr> <td>51,5</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep hůře odstranitelný; ve formě krápníků; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	2,40	0,45	43,2	47,5	47,8	51,5
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
2,40	0,45	43,2	47,5								
		47,8									
		51,5									
 <p style="text-align: center;"><i>SS+AIR, v = 1,00 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>SS+AIR, v = 1,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1751 1295 1930"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1,00</td> <td rowspan="3">0,96</td> <td>63,4</td> <td rowspan="3">57,8</td> </tr> <tr> <td>54,8</td> </tr> <tr> <td>55,2</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep špatně odstranitelný; ve formě krápníků; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	1,00	0,96	63,4	57,8	54,8	55,2
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
1,00	0,96	63,4	57,8								
		54,8									
		55,2									

Příloha číslo 5

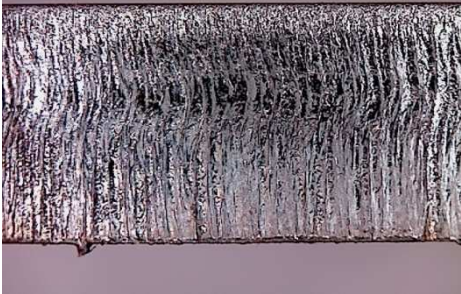




Vzorky z nerezové oceli X5CrNi18-10 řezané dusíkem



Vzorky z oceli X5CrNi18-10 řezané dusíkem

Technologické parametry pro řezání oceli X5CrNi18-10 dusíkem

Výkon laseru	[W]	4000
Rychlost řezu	[m/min]	5,25
Řezací tlak	[bar]	20
Ø trysky	[mm]	2
Poloha ohniska	[mm]	-2,90

 <p><i>SS+N₂, v = 5,25 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>SS+N₂, v = 5,25 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 264 1295 443"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">5,25</td> <td rowspan="3">0,15</td> <td>27,7</td> <td rowspan="3">29,8</td> </tr> <tr> <td>31,3</td> </tr> <tr> <td>30,4</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep snadno odstranitelný; ve formě kuliček; velmi nízký výskyt</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	5,25	0,15	27,7	29,8	31,3	30,4
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
5,25	0,15	27,7	29,8								
		31,3									
		30,4									
 <p><i>SS+N₂, v = 4,20 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>SS+N₂, v = 4,20 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 636 1295 815"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">4,20</td> <td rowspan="3">0,16</td> <td>28,0</td> <td rowspan="3">31,8</td> </tr> <tr> <td>34,0</td> </tr> <tr> <td>33,5</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep snadno odstranitelný; ve formě kuliček; velmi nízký výskyt</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	4,20	0,16	28,0	31,8	34,0	33,5
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
4,20	0,16	28,0	31,8								
		34,0									
		33,5									
 <p><i>SS+N₂, v = 3,10 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>SS+N₂, v = 3,10 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1008 1295 1187"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">3,10</td> <td rowspan="3">0,12</td> <td>33,8</td> <td rowspan="3">34,1</td> </tr> <tr> <td>33,2</td> </tr> <tr> <td>35,2</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep snadno odstranitelný; ve formě kuliček; nízký výskyt</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	3,10	0,12	33,8	34,1	33,2	35,2
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
3,10	0,12	33,8	34,1								
		33,2									
		35,2									
 <p><i>SS+N₂, v = 2,10 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>SS+N₂, v = 2,10 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1379 1295 1559"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">2,10</td> <td rowspan="3">0,19</td> <td>36,4</td> <td rowspan="3">32,7</td> </tr> <tr> <td>30,1</td> </tr> <tr> <td>31,5</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep snadno odstranitelný; ve formě kuliček; nízký výskyt</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	2,10	0,19	36,4	32,7	30,1	31,5
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
2,10	0,19	36,4	32,7								
		30,1									
		31,5									
 <p><i>SS+N₂, v = 1,00 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>SS+N₂, v = 1,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1751 1295 1930"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1,00</td> <td rowspan="3">1,56</td> <td>42,4</td> <td rowspan="3">40,3</td> </tr> <tr> <td>36,1</td> </tr> <tr> <td>42,4</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep špatně odstranitelný; ve formě krápníků; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	1,00	1,56	42,4	40,3	36,1	42,4
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
1,00	1,56	42,4	40,3								
		36,1									
		42,4									

Příloha číslo 6

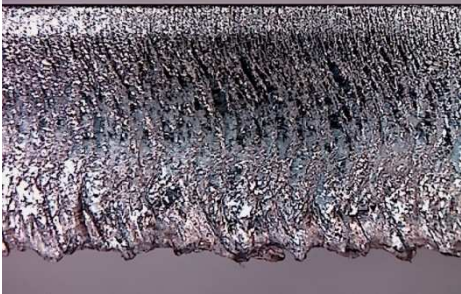
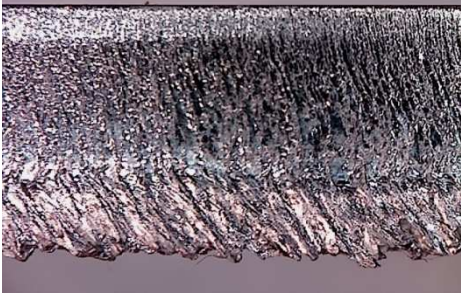

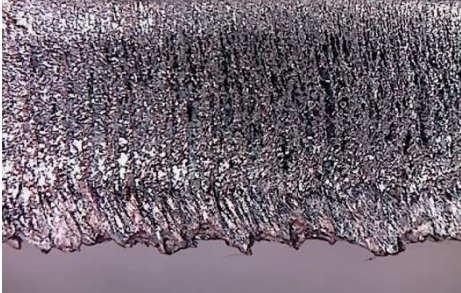

Vzorky z hliníku EN AW-1050A H24 řezané vzduchem



Vzorky z hliníku EN AW-1050A H24 řezané vzduchem

Technologické parametry pro řezání hliníku EN AW-1050A H24 vzduchem

Výkon laseru	[W]	4000
Rychlost řezu	[m/min]	5,00
Řezací tlak	[bar]	12,5
Ø trysky	[mm]	1,5
Poloha ohniska	[mm]	-2,30

 <i>AL+AIR , v = 5,00 m/min</i>	<p style="text-align: center;"><i>AL+AIR , v = 5,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 264 1295 443"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">5,00</td> <td rowspan="3">0,28</td> <td>31,9</td> <td rowspan="3">35,8</td> </tr> <tr> <td>32,4</td> </tr> <tr> <td>43,1</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep hůře odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	5,00	0,28	31,9	35,8	32,4	43,1
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
5,00	0,28	31,9	35,8								
		32,4									
		43,1									
 <i>AL+AIR , v = 4,00 m/min</i>	<p style="text-align: center;"><i>AL+AIR , v = 4,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 636 1295 815"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">4,00</td> <td rowspan="3">0,33</td> <td>53,9</td> <td rowspan="3">51,0</td> </tr> <tr> <td>45,8</td> </tr> <tr> <td>53,2</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep hůře odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	4,00	0,33	53,9	51,0	45,8	53,2
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
4,00	0,33	53,9	51,0								
		45,8									
		53,2									
 <i>AL+AIR , v = 3,00 m/min</i>	<p style="text-align: center;"><i>AL+AIR , v = 3,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1008 1295 1187"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">3,00</td> <td rowspan="3">0,38</td> <td>53,4</td> <td rowspan="3">54,5</td> </tr> <tr> <td>54,0</td> </tr> <tr> <td>56,0</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep hůře odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	3,00	0,38	53,4	54,5	54,0	56,0
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
3,00	0,38	53,4	54,5								
		54,0									
		56,0									
 <i>AL+AIR , v = 2,00 m/min</i>	<p style="text-align: center;"><i>AL+AIR , v = 2,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1379 1295 1559"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">2,00</td> <td rowspan="3">0,29</td> <td>58,8</td> <td rowspan="3">62,8</td> </tr> <tr> <td>55,4</td> </tr> <tr> <td>74,2</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep hůře odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	2,00	0,29	58,8	62,8	55,4	74,2
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
2,00	0,29	58,8	62,8								
		55,4									
		74,2									
 <i>AL+AIR , v = 1,00 m/min</i>	<p style="text-align: center;"><i>AL+AIR , v = 1,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1751 1295 1930"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1,00</td> <td rowspan="3">0,44</td> <td>67,4</td> <td rowspan="3">63,8</td> </tr> <tr> <td>61,1</td> </tr> <tr> <td>62,9</td> </tr> </tbody> </table> <p>Otřep hůře odstranitelný; v souvislé vrstvě; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	1,00	0,44	67,4	63,8	61,1	62,9
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
1,00	0,44	67,4	63,8								
		61,1									
		62,9									

Příloha číslo 7

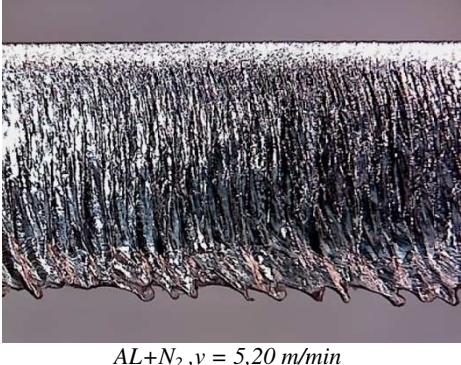
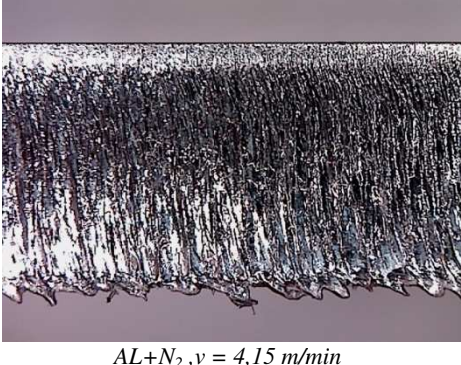
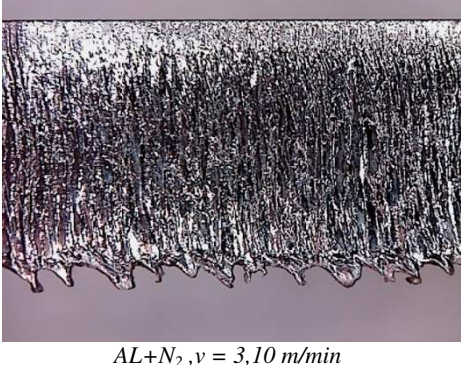
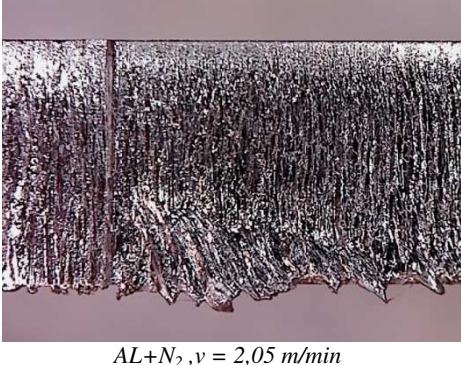
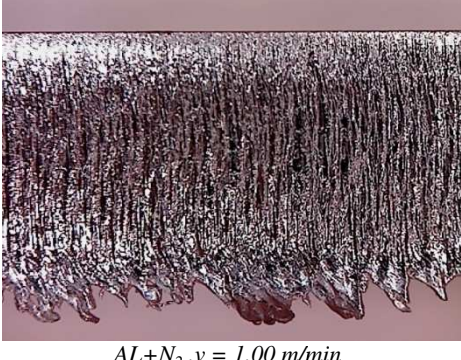
Vzorky z hliníku EN AW-1050A H24 řezané dusíkem



Vzorky z hliníku EN AW-1050A H24 řezané dusíkem


Technologické parametry pro řezání hliníku EN AW-1050A H24 dusíkem

Výkon laseru	[W]	4000
Rychlost řezu	[m/min]	5,20
Řezací tlak	[bar]	18
Ø trysky	[mm]	2
Poloha ohniska	[mm]	-1,30

 <p style="text-align: center;"><i>AL+N₂, v = 5,20 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>AL+N₂, v = 5,20 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 264 1295 443"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">5,20</td> <td rowspan="3">0,39</td> <td>51,1</td> <td rowspan="3">50,9</td> </tr> <tr> <td>50,8</td> </tr> <tr> <td>50,7</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep hůře odstranitelný; ve formě krápníků; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	5,20	0,39	51,1	50,9	50,8	50,7
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
5,20	0,39	51,1	50,9								
		50,8									
		50,7									
 <p style="text-align: center;"><i>AL+N₂, v = 4,15 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>AL+N₂, v = 4,15 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 636 1295 815"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">4,15</td> <td rowspan="3">0,41</td> <td>61,1</td> <td rowspan="3">58,4</td> </tr> <tr> <td>58,1</td> </tr> <tr> <td>55,9</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep hůře odstranitelný; ve formě krápníků; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	4,15	0,41	61,1	58,4	58,1	55,9
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
4,15	0,41	61,1	58,4								
		58,1									
		55,9									
 <p style="text-align: center;"><i>AL+N₂, v = 3,10 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>AL+N₂, v = 3,10 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1008 1295 1187"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">3,10</td> <td rowspan="3">0,51</td> <td>70,9</td> <td rowspan="3">67,5</td> </tr> <tr> <td>71,0</td> </tr> <tr> <td>60,6</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep hůře odstranitelný; ve formě krápníků; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	3,10	0,51	70,9	67,5	71,0	60,6
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
3,10	0,51	70,9	67,5								
		71,0									
		60,6									
 <p style="text-align: center;"><i>AL+N₂, v = 2,05 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>AL+N₂, v = 2,05 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1379 1295 1559"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">2,05</td> <td rowspan="3">0,53</td> <td>65,3</td> <td rowspan="3">71,2</td> </tr> <tr> <td>78,1</td> </tr> <tr> <td>70,1</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep hůře odstranitelný; ve formě krápníků; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	2,05	0,53	65,3	71,2	78,1	70,1
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
2,05	0,53	65,3	71,2								
		78,1									
		70,1									
 <p style="text-align: center;"><i>AL+N₂, v = 1,00 m/min</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>AL+N₂, v = 1,00 m/min</i></p> <table border="1" data-bbox="753 1751 1295 1930"> <thead> <tr> <th>v [m/min]</th> <th>otřep [mm]</th> <th>Rz5_i [μm]</th> <th>ØRz5 [μm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1,00</td> <td rowspan="3">1,01</td> <td>72,8</td> <td rowspan="3">71,0</td> </tr> <tr> <td>73,0</td> </tr> <tr> <td>67,1</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Otřep hůře odstranitelný; ve formě krápníků; výskyt po celém obvodu</p>	v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]	1,00	1,01	72,8	71,0	73,0	67,1
v [m/min]	otřep [mm]	Rz5 _i [μm]	ØRz5 [μm]								
1,00	1,01	72,8	71,0								
		73,0									
		67,1									


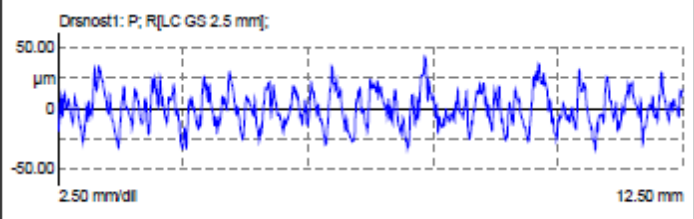
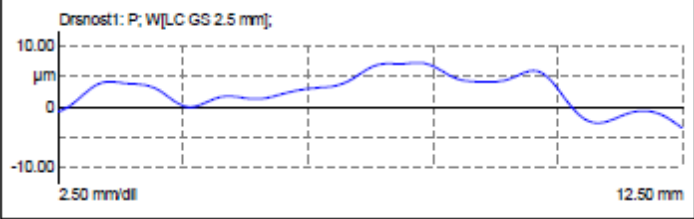
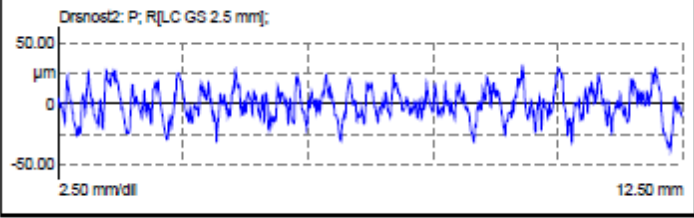
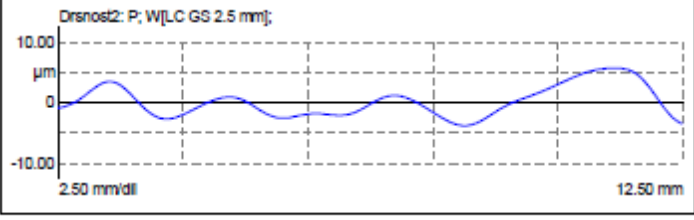
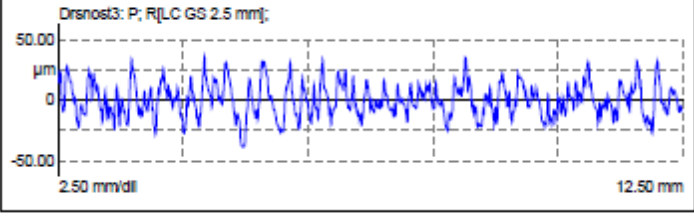
Příloha 8


Kalibrační protokol Mahr

 MarWin 8.00-24 SP 2		Kalibrační protokol	14.5.2018 1 09:21:39 Kontrolor:
DI:		Číslo výtisku:	Krok obrábění:
			Podpis:
Komentář:			
<p>Uživatel MarWin: Urban</p> <p>Datum: 14.05.2018</p> <p>Čas: 09:21:39</p> <p>Interval platnosti: 60 dnů</p> <p>Posuvová jednotka: DriveUnit.PGK 20</p> <p>Tovární číslo: -----</p> <p>Systém snímače: MFW-250:2</p> <p>Tovární číslo: 1854</p> <p>Kalibrační postup: Ra na kalibrovaném etalonu drsnosti</p> <p>Osa posuvu: X</p> <p>Jmenovitá hodnota: 0.900 μm</p> <p>Počet měření: 3</p> <p>Snímaná délka Lt: 5.60 mm</p> <p>Díličí měřicí délky N: 5</p> <p>Mezní vlnová délka Lc: 0.80 mm</p> <p>Mezní vlnová délka Ls: 2.5 μm</p> <p>Rychlost měření Vt: 0.5 mm/s</p> <p>Měřicí rozsah: 1</p> <p>Rozpětí měření: 0.001 μm</p> <p>Hodnota korekce: -0.4 %</p>			

Příloha 9

Příklad protokolu z měření drsnosti

		MarWin 8.00-24 SP 2	ČVUT Praha, Fakulta strojní	14.5.2018 1 14:19:10 Kontrolor: Urban Jan Podpis:						
Díl: AL_AIR_1,00		Číslo výkresu:	Krok obrábění:							
		MaŠ Zeiss ČVUT								
Marsurf PGK										
Komentář:										
Měřicí přístroj: MarTalk Posuvová jednotka: DriveUnit.PGK 20 Snímač: MFW-250:2 (#1854) -0.4 %		Lt: 17.50 mm Ls: 8.00 μm VB: +/-250.0 μm Vt: 0.50 mm/s Body: 11886								
Drsnost1: P; R[LC GS 2.5 mm]; 		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>11,7103 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>67,4003 μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>75,5269 μm</td></tr> </table>			Ra	11,7103 μm	Rz	67,4003 μm	Rmax	75,5269 μm
Ra	11,7103 μm									
Rz	67,4003 μm									
Rmax	75,5269 μm									
Drsnost1: P; W[LC GS 2.5 mm]; 		<table border="1"> <tr><td>Wa</td><td>3,2428 μm</td></tr> </table>			Wa	3,2428 μm				
Wa	3,2428 μm									
Drsnost2: P; R[LC GS 2.5 mm]; 		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>10,1235 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>61,1240 μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>68,6605 μm</td></tr> </table>			Ra	10,1235 μm	Rz	61,1240 μm	Rmax	68,6605 μm
Ra	10,1235 μm									
Rz	61,1240 μm									
Rmax	68,6605 μm									
Drsnost2: P; W[LC GS 2.5 mm]; 		<table border="1"> <tr><td>Wa</td><td>2,0946 μm</td></tr> </table>			Wa	2,0946 μm				
Wa	2,0946 μm									
Drsnost3: P; R[LC GS 2.5 mm]; 		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>10,8997 μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>62,8978 μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>75,3419 μm</td></tr> </table>			Ra	10,8997 μm	Rz	62,8978 μm	Rmax	75,3419 μm
Ra	10,8997 μm									
Rz	62,8978 μm									
Rmax	75,3419 μm									

 MarWin 8.00-24 SP 2		ČVUT Praha, Fakulta strojní	14.5.2018 2 14:19:10 Kontrolor: Urban Jan Podpis:
Díl: AL_AIR_1,00		Číslo výkresu:	Krok obrábění:
Marsurf PGK		MaŠ Zeiss ČVUT	
Komentář:			
		Wa 2,1723 µm	
Seznamy parametrů drsnosti - Drsnost1: P; R[LC GS 2.5 m		Seznamy parametrů drsnosti - Drsnost2: P; R[LC GS 2.5 m	
Rz 1	68,0609 µm	Rz 1	57,9892 µm
Rz 2	63,2664 µm	Rz 2	60,1874 µm
Rz 3	75,5269 µm	Rz 3	55,2005 µm
Rz 4	63,8068 µm	Rz 4	63,5823 µm
Rz 5	66,3405 µm	Rz 5	68,6605 µm
Rz sigma	4,9398 µm	Rz sigma	5,2114 µm
Seznamy parametrů drsnosti - Drsnost3: P; R[LC GS 2.5 m			
Rz 1	62,2338 µm		
Rz 2	75,3419 µm		
Rz 3	55,2853 µm		
Rz 4	60,8346 µm		
Rz 5	60,7424 µm		
Rz sigma	7,4523 µm		