



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE VÝROBY SOUČÁSTKY Z KONSTRUKČNÍ OCELI TL. 20 MM TECHNOLOGIÍ LASEROVÉHO DĚLENÍ

OPTIMIZATION OF A PART PRODUCTION MADE OF A STRUCTURAL 20 MM THICK STEEL USING LASER CUTTING TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Hynek Šoukal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Hynek Šoukal
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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

Optimalizace výroby součástky z konstrukční oceli tl. 20 mm technologií laserového dělení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Optimalizovat procesní parametry (řezná rychlost, tlak plynu, výkon laseru, poloha ohniska) při oxidačním laserovém dělení konstrukční oceli tloušťky 20 mm s ohledem na typ materiálu, výslednou drsnost řezu a výslednou cenu výrobku.

Cíle diplomové práce:

- osvojit si základy technologie laserového dělení materiálu,
- osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu,
- při variaci procesních parametrů využít Taguchiho metodu,
- osvojit si základy kontaktního měření drsnosti.

Seznam literatury:

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

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

ŠOUKAL Hynek: Optimalizace výroby součástky z konstrukční oceli tl. 20 mm technologií laserového dělení.

Práce se zabývá optimalizací procesních parametrů při oxidačním laserovém dělení konstrukční oceli tloušťky 20 mm s ohledem na typ materiálu, výslednou drsnost řezu a výslednou cenu výrobku. V souladu s literární studií a také podle Taguchiho metody byl vypracován experiment. V rámci experimentu byla regulována řezná rychlost, výkon laseru, tlak řezného plynu a poloha ohniska. Sady vzorků byly vyřezány pomocí 7,5" a 10" fokusační čočky z ocelí TATA STEEL S355MC a SSAB LASER 355 MC. Dle normy ČSN EN ISO 9013 došlo k vyhodnocení vzorků z hlediska drsnosti. Poté byly vyhodnoceny mikro a makro struktury a porovnány tvrdosti dle Vickerse. Závěrem bylo stanoveno technicko – ekonomické vyhodnocení.

Klíčová slova: řezná plocha, fokusační čočka, CO₂ laser, laserové řezání, ČSN EN ISO 9013

ABSTRACT

ŠOUKAL Hynek: Optimization of a part production made of a structural 20 mm thick steel using laser cutting technology.

The thesis deals with the optimization of process parameters in the oxidative laser cutting of structural 20 mm thick steel with regard to the type of material, the resulting roughness of the cut and the resulting price of the product. In line with the literary study and the Taguchi method, an experiment was developed. The cutting speed, laser performance, cutting gas pressure, and focal position were controlled during the experiment. Sample sets were cut with 7.5" and 10" focusing lens from the TATA STEEL S355MC and SSAB LASER 355 MC steels. According to ČSN EN ISO 9013, the samples were evaluated for roughness. Then micro and macro structures were evaluated, and compare the hardness according to Vickers. In conclusion, technical and economic evaluation was determined.

Key words: cutting surface, focusing lens, CO₂ laser, laser cutting, ČSN EN ISO 9013

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠOUKAL, H. *Optimalizace výroby součástky z konstrukční oceli tl. 20 mm technologií laserového dělení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace výroby součástky z konstrukční oceli tl. 20 mm technologií laserového dělení** vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24.5.2017

.....
Datum

.....
Bc. Hynek Šoukal

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji svému vedoucímu panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky týkající se zpracování diplomové práce. Dále děkuji společnosti Horácké kovodružstvo Třebíč za umožnění realizace experimentu, poskytnutí potřebných dokumentů a konzultací. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při tvorbě této práce.

OBSAH

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

ÚVOD	10
1 LASER	11
1.1 Konstrukční princip laseru	11
1.2 Vlastnosti laserového světla	11
1.3 Vliv laserového světla na materiál	12
1.4 Klasifikace laserů	13
2 TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH PRO DĚLENÍ MATERIÁLŮ	14
2.1 CO ₂ laser	14
2.2 Tyčkový – Nd: YAG	15
2.3 Diskový laser	16
2.4 Vláknový laser	17
2.5 Diodový laser	17
2.6 Vlastnosti laserového paprsku z hlediska jeho technických vlastností	18
3 POUŽITÍ LASERU VE STROJÍRENSTVÍ	20
3.1 Laserové svařování	20
3.2 Laserové kalení	21
3.3 Laserové navařování	22
3.4 Laserové řezání	22
3.4.1 Tavné řezání	23
3.4.2 Oxidační řezání	24
3.4.3 Sublimační řezání	24
3.4.4 Laserové řezání stlačeným vzduchem	25
3.4.5 Parametry ovlivňující proces laserového řezání	25
4 VOLBA MATERIÁLŮ	31
4.1 Materiál TATA STEEL S355MC	31
4.2 Materiál SSAB Laser 355 MC Plus	31
5 KVALITA A DRSNOST POVRCHU	32
5.1 Norma ČSN EN ISO 9013	33
5.2 Úchylka kolmosti	33
5.3 Průměrná výška prvků profilu Rz5	33
5.4 Rozměrové úchyly dílů	35

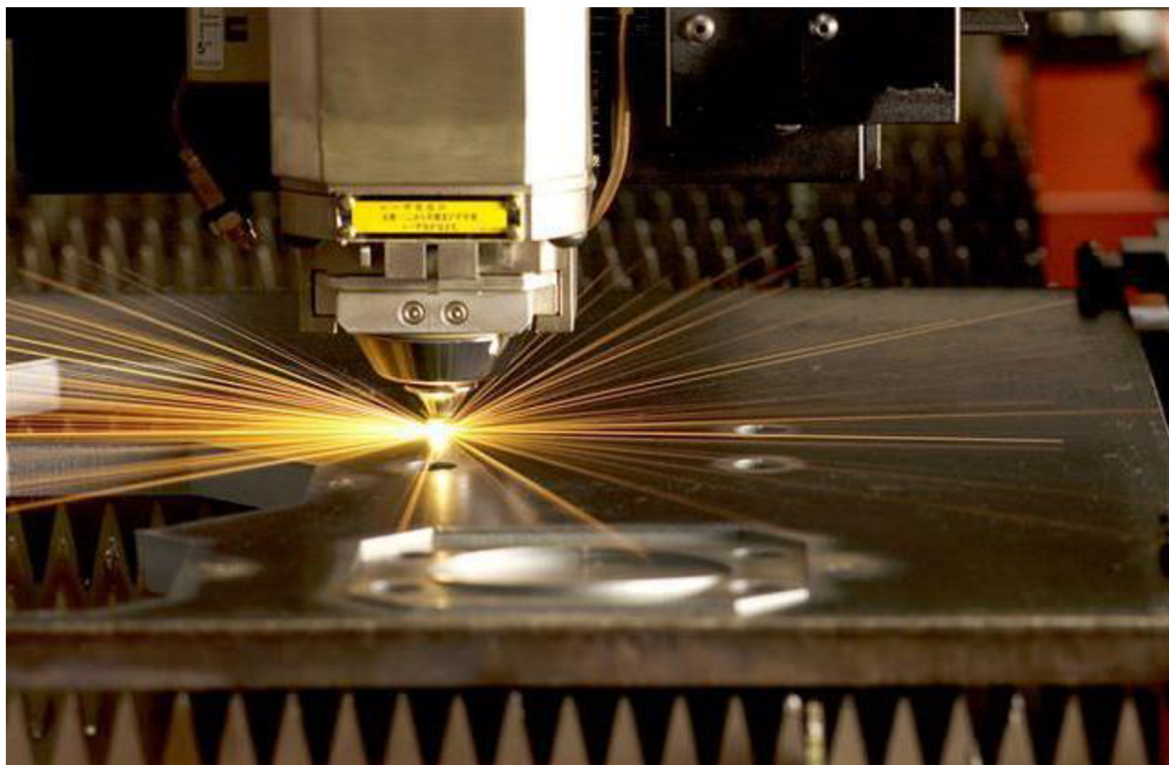
5.5 Taguchiho metoda.....	37
6 FIRMA HORÁCKÉ KOVODRUŽSTVO TŘEBÍČ	39
7 EXPERIMENT	40
7.1 Sada vzorků ocele TATA STEEL S355MC	41
7.2 Sada vzorků ocele SSAB LASER 355 MC PLUS	47
7.3 Měření drsnosti vzorků	51
7.3.1 Hodnoty drsnosti vzorků oceli S355MC řezané 7,5" čočkou	52
7.3.2 Hodnoty drsnosti vzorků oceli S355MC řezané 10" čočkou	54
7.3.3 Hodnoty drsnosti vzorků oceli SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 7,5" čočkou ..	56
7.3.4 Hodnoty drsnosti vzorků oceli SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 10" čočkou ...	58
7.4 Vyhodnocení tepelně ovlivněné oblasti	60
7.5 Zhodnocení mikro struktury vzorků v základní oblasti obou materiálů.	62
7.6 Vyhodnocení mikro struktury v tepelně ovlivněné oblasti.	63
7.7 Posouzení tvrdosti vzorků.....	64
8 TECHNICKO – EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ.....	66
9 DISKUZE	67
9.1 Návrh na zlepšení experimentu.....	67
ZÁVĚR	68
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	
SEZNAM PŘÍLOH	
PŘÍLOHY	

ÚVOD

V průběhu let, kdy docházelo ke stále větším nárokům na přesnost výroby součástí, dodržení tvarové složitosti, zkrácení strojních časů nebo také větší úspoře nákladů mělo za následek vzniku nových výrobních postupů, mezi které patří také laserová technologie. Tato technologie díky svými unikátními vlastnostmi umožňuje využití pro řezání, vrtání, kalení, navařování, sváření, gravírování. Na obr. 1 je znázorněna ukázka laserového řezání [1, 2].

U řezání může být laserový svazek použit na kovové materiály jako je konstrukční uhlíková ocel, korozivzdorná ocel, hliník nebo nekovové materiály jako je plast, dřevo, sklo a keramika. Možnosti využití této technologie jsou tedy velmi rozsáhlé, při dosažení kvalitní úrovně řezu. V dnešní době tato technologie tvoří neodmyslitelnou součást strojírenské výroby, proto se výrobou těchto strojů zabývá trvale více firem. Tím pádem cena těchto strojů mírně klesá a tyto stroje jsou více dostupné pro širší spektrum zákazníků [1, 2, 3].

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací procesních parametrů sady vzorků, které se týkají rezné rychlosti, tlaku plynu a výkonu laseru, při oxidačním laserovém dělení konstrukční oceli tloušťky 20 mm plynovým CO₂ laserem. Vzorky budou řezány 7,5 palcovou a 10 palcovou čočkou a budou porovnány z technického a ekonomického hlediska.



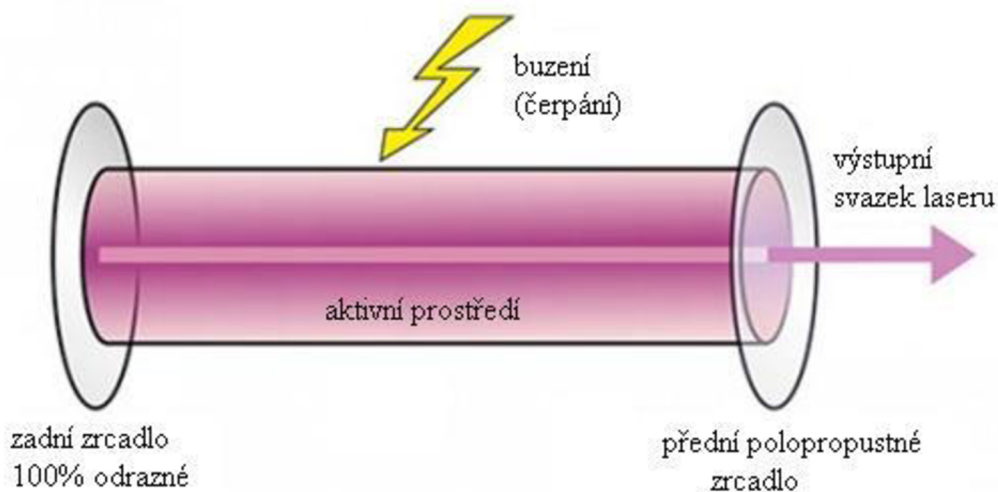
Obr. 1 Ilustrativní příklad řezání laserem [4].

1 LASER

Laser v roce 2010 oslavil 50 let existence. Během těchto let našel uplatnění v řadě odvětví jako je medicína, průmysl, věda, výzkum a také například v řadě věcí jako jsou počítačové CD-ROM, laserová ukazovátka nebo také při čtení čárových kódů v obchodech se kterými se setkáváme běžně v životě. Slovo laser znamená zkratku „light amplification by the stimulated emission of radiation“ což v překladu znamená zesilování světla stimulovanou emisí záření. Už v roce 1917 Albert Einstein vysvětlil pojem stimulovaná emise avšak až v roce 1960 Theodor H. Maiman v USA předvedl první pevnolátkový rubínový laser. V roce 1963 indický fyzik a elektrotechnik C. Kumar N. Patel vytvořil plynový CO₂ laser, který našel uplatnění pro řezání plechů. Později došlo k vynalezení také pevnolátkového laseru Nd:YAG který se uplatnil v oblasti svařování [5, 6, 7, 8, 9, 10].

1.1 Konstrukční princip laseru

Na obr. 2 je zobrazen laser, jehož aktivní prostředí je tvořeno rezonátorem. Rezonátor se skládá ze dvou zrcadel, které jsou paralelně umístěny k sobě. Zadní zrcadlo, které je nepropustné, bývá většinou zakřivené ke snížení ztrát difrakce oscilační síly, a také ke sladění zrcadel bez zbytečných potíží. Neboť na poloměrech zakřivení zrcadel a také délce rezonátoru závisí stabilita aktivního prostředí. Přední zrcadlo je vyrobeno tak, že při každém odrazu propouští malou část laserového světla, odkud pak vystupuje svazek laserového světla [6, 11, 12].



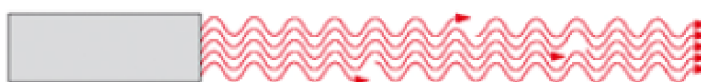
Obr. 2 Schéma laseru [13].

Aktivní prostředí mezi zrcadly je buzeno (elektricky, opticky, atd.). Tímto buzením se nahromaděná energie stimulovanou emisí vyzáří jako světelný laserový svazek. Díky těmto vlastnostem lze uplatnit laserové světlo v průmyslu, k opracování materiálu, kde se laserový svazek fokusuje do jednoho místa o velmi vysoké hodnotě plošné hustoty energie [6].

1.2 Vlastnosti laserového světla

Díky níže uvedeným speciálním vlastnostem může být laserové světlo uplatňováno v mnoha aplikacích. Na rozdíl od světla různých vlnových délek, které je z přírodních zdrojů, jako je svíčka nebo slunce [9, 14, 15].

- Monochromatické - v laserovém paprsku mají všechny fotony stejnou vlnovou délku viz obr. 3. Absorpce kovu se zvyšuje s vzrůstající vlnovou délkou. Ostrost laserů může dosahovat hodnot až $1 : 10^{15}$
- Směrové - laserový svazek má velmi malou rozbíhavost, jeho odchýlení od přesné rovnoběžnosti je na výstupní cloně laseru v důsledku difrakce.
- Laserové světlo je možné ostře fokusovat na velmi vysokou hustotu záření.

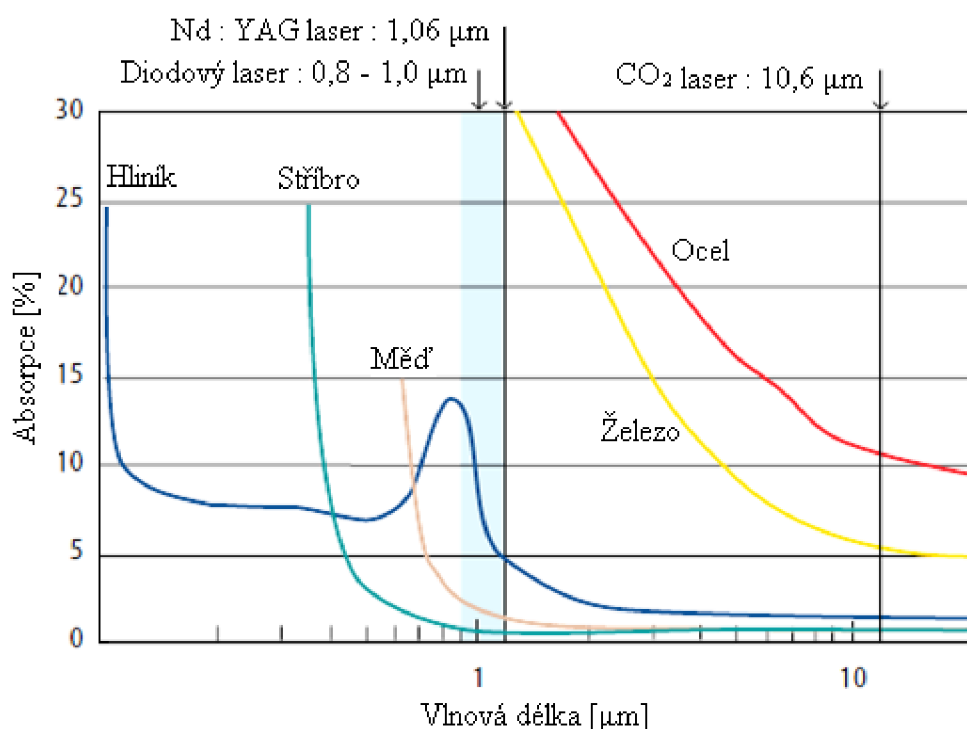


Obr. 3 Monochromatické koherentní laserové záření [14].

1.3 Vliv laserového světla na materiál

Laserové technologie umožňují obrábění materiálu bez mechanického kontaktu. Aby mohlo docházet k účinnému působení laserového světla na materiál záleží na jeho vlastnostech, mezi které patří absorpce (pohlčení), tepelná vodivost a odrazivost. Graf na obr. 4 znázorňuje závislost absorpce záření laseru působícího na různé materiály vlnových délek. Také znázorňuje vliv absorpce materiálu na pevnolátkovém, diodovém a CO₂ laseru [16, 17].

CO₂ laser má zhruba 10 krát větší vlnovou délku záření oproti pevnolátkovému laseru, což znamená, že má větší stopu paprsku a tím menší hustotu energie paprsku. Z grafu je vidět, že pro řezání kovových materiálů je výhodnější použít pevnolátkový laser s menší vlnovou délkou záření, neboť je více pohlcována těmito materiály. V praxi to znamená výhodnější použití pevnolátkových laserů při řezání tenkých plechů, u silných plechů nejsou mezi oběma druhy laserů podstatné rozdíly. Nicméně stupeň absorpce je závislý na úhlu dopadu laserového paprsku, na teplotě a vlastnostech povrchu materiálu. U materiálu jako je dřevo, sklo, plasty, textil nebo papír není téměř vlnová délka záření pevnolátkových laserů absorbována, proto je zde nutné použít CO₂ laser [16, 17].



Obr. 4 Graf závislosti absorpce laseru na vlnové délce u různých materiálech při 20°C [72].

1.4 Klasifikace laserů

Lasery lze rozdělit podle různých typů a druhů kritérií podle [1, 18, 19]:

Aktivního prostředí

- pevnolátkový – (Nd:YAG, diskový, vláknový, diodový),
- plynový – (atomární He-Ne, molekulární CO₂, iontový Ar, Kr),
- kapalinový (na bázi organických barviv),
- plazmový.

Časového režimu

- kontinuální – nepřetržité generování záření,
- pulzní – pulzy s vysokou opakovací frekvencí.

Vlnové délky optického záření

- infračervené lasery pulzní (780 – 1 mm),
- lasery v oblasti viditelného světla (360 – 780 nm),
- ultrafialové lasery (10 – 360 nm),
- rentgenové lasery (10 – 1 pm).

Způsobu čerpání energie

- opticky,
- elektricky,
- chemicky,
- jadernou energií.

Rozsah použití laserů:

V průmyslu

- řezání,
- svařování a pájení,
- gravírování a značení,
- vrtání,
- mikroobrábění,
- kalení.

V medicíně:

- oční lékařství,
- dermatologie,
- chirurgie,
- onkologie.

V holografii:

- hologramy.

2 TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH PRO DĚLENÍ MATERIÁLŮ

Mezi nejvíce rozšířené lasery používané ve strojírenství se řadí plynové CO₂. I přesto, že tento typ laserů je mírně limitující vedením laserového svazku optikou zrcadel. Nicméně v posledních letech jsou tyto lasery částečně nahrazovány pevnolátkovými lasery. Mezi největší přednost pevnolátkových laserů patří jejich vyšší účinnost [19].

2.1 CO₂ laser

CO₂ laser patří mezi nejstarší plynové lasery a stále se řadí mezi nejpoužívanější lasery pro řezání a svařování. Může pracovat v pulzním i kontinuálním režimu. Aktivní médium, je tvořeno směsí plynů oxidu uhličitého (CO₂), dusíku (N₂) a helia (He). Molekula oxidu uhličitého emituje laserové světlo, ostatní plyny přispívají k laserovému procesu. Laserové záření osciluje v optickém rezonátoru, který následně emituje infračervené záření vlnové délky 10,6 μm, toto laserové záření je vedeno soustavou zrcadel až do řezací hlavy. Typický výkon se pohybuje od 500 do 5000 W, avšak mohou dosahovat až 20 kW. Účinnost se pohybuje okolo 5 – 10 % [20, 21, 22].

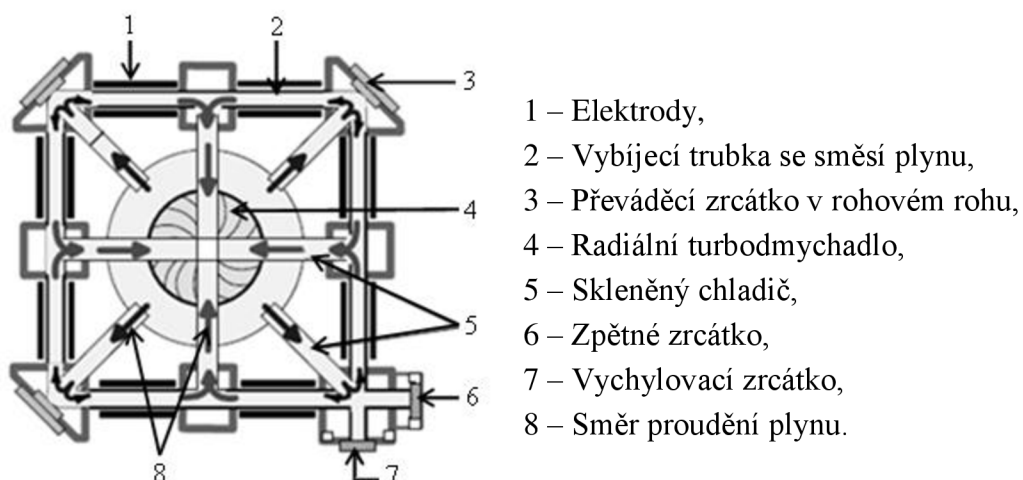
Podle konstrukčního uspořádání se laser dělí na axiální nebo příčnou excitací aktivního prostředí:

CO₂ lasery s pomalým prouděním - axiální

Jedná se o tradiční nejstarší typ CO₂ laseru. Zdrojem energie aktivního prostředí je stejnosměrný nebo střídavý elektrický výboj. Směr výboje se shoduje s osou rezonátoru a vystupujícím laserovým svazkem. Provoz laseru může být pulzní i kontinuální a dosahuje výstupního výkonu cca 1000 W, který je limitován množstvím chlazení na jeden metr délky rezonátoru. Výhodou je hladký a jakostní řez důsledkem stabilního výstupního výkonu a dobré módové charakteristiky svazku [20, 21, 22].

CO₂ lasery s rychlým prouděním

Tento typ laseru má magneticky uložené radiální turbodmychadlo (viz obr. 5), které způsobuje neustálé proudění plynu, ten zůstává jenom krátce ve vybíjecí trubce a jeho chlazení je mimo dutinu rezonátoru ve skleněném chladiči. Plyn je buzen elektrickým výbojem. Výhodou laseru je velmi vysoký výkon, který může být až 20 kW, nicméně typický výkon je v rozmezí 500 – 5000 W. Naopak nevýhodou je jeho složitější konstrukce, která je náročnější na údržbu. Uplatnění nachází nejvíce pro řezání, eventuelně pro svařování nebo povrchové úpravy [20, 21, 22].



Obr. 5 Schéma konstrukce CO₂ s rychlým podélným prouděním [14].

CO₂ lasery s příčným prouděním

Tento laser je specifickým svoji konstrukcí, kde laserový svazek, elektrický výboj a proudění plynu jsou ve třech odlišných směrech. Plyn je buzen střídavým výbojem. Výkon na jeden metr rezonátoru je až 1000 W. Maximální výkon může být až 20 kW. Výboj tohoto laseru je těžko říditelný, nemá tedy tak kvalitní výstupní laserový svazek. Uplatnění nachází pro svařování a povrchové kalení, ojedinele pro řezání [20, 21, 22].

SLAB laser

Je kompaktní laser, který má výboj udržován mezi dvěma vysokofrekvenčními velkoplošnými měděnými elektrodami. Elektrody zajišťují vodní difuzí odvod tepla vzniklého při buzení laserového plynu. Způsobem jakým dochází k buzení je zajištěna vysoká kvalita laserového svazku. Dosahuje výkonu až 8 kW. Díky SLAB technologii jsou rozměry na cca 1/10 velikosti konvenčních laserů, díky tomu může vestavěn do různých laserových systémů [20, 21, 22].

Výhodou je fokusování laserového svazku do čtyřikrát ostřejšího a menšího ohniska oproti jakémukoliv jinému typu laseru. Uplatnění nachází pro řezání nebo svařování s vyššími rychlostmi s tím souvisí následně menší tepelné ovlivnění okolí. Při provádění širších svarů je možné pomocí doplňkové optiky zvětšit průměr svazku [20, 21, 22].

Příklady výrobců CO₂ laserů:

Mezi nejznámější světové výrobce CO₂ laserů patří tyto společnosti [23]:

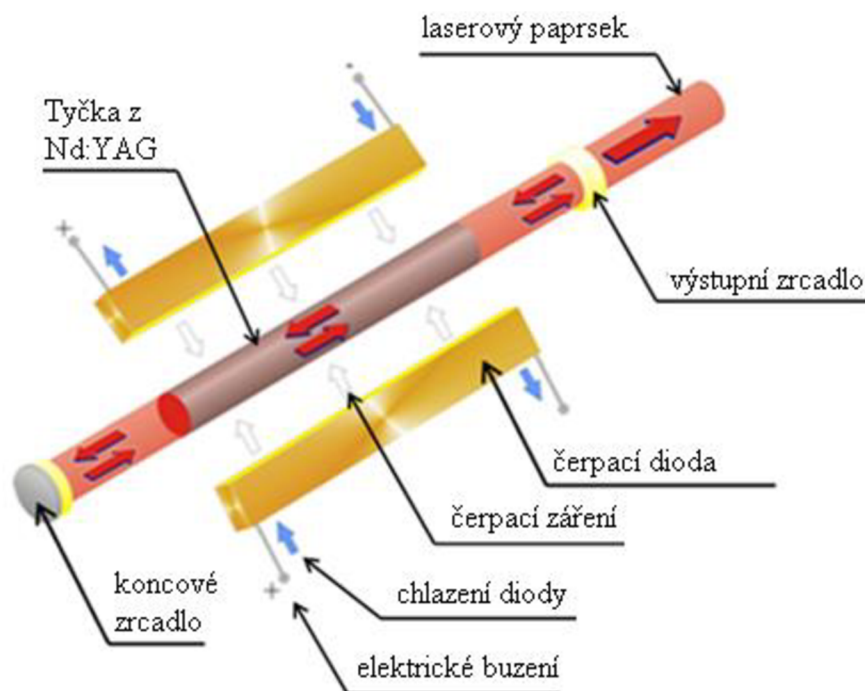
- TRUMPF,
- Amada,
- LVD.
- Bystronic.
- Mazak.

2.2 Tyčkový – Nd: YAG

Dá se říct, že to je z pevnolátkových laserů jeden z nejstarších typů. Tento typ laseru je možné rozdělit na buzený výbojkami (LPSS – lamp pumped solid state) nebo buzený diodami (DPSS – diode pumped solid state). LPSS Nd:YAG laser má nižší účinnost. Část elektrické energie se přemění na světelnou a další část se nevyužije a přemění se na teplo. DPSS ND:YAG laser (viz obr. 6) můžeme rozdělit na dva typy buzení boční nebo zadní podle umístění rezonátoru. Lepší kvality svazku je dosaženo u zadního buzení oproti bočnímu buzení. Naopak vyšší výkon je dosažen u bočního buzení. V pulzním režimu, laser generuje velice krátké pulsy a dosahuje výkonu v řádech 100 W. V kontinuálním režimu laser dosahuje výkonu až do cca 6 kW. Nevýhodou je účinnost v řádech jednotek procent. Uplatnění nachází pro značení, gravírování kovů a plastů [24, 25].

Mezi nejznámější světové výrobce tyčkových – ND:YAG laserů patří společnosti [23]:

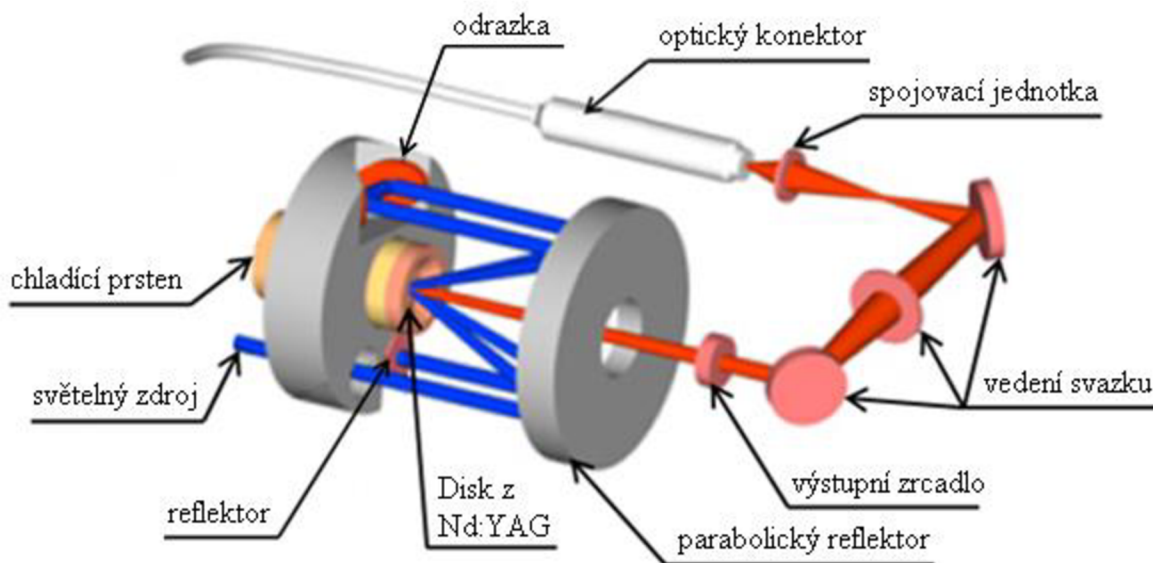
- GSI JK Lasers,
- Rofin,
- Lasag.



Obr. 6 Schéma diodou čerpaného tyčkového Nd:YAG laseru [19].

2.3 Diskový laser

Tento moderní laser je principiálně podobný Nd:YAG laseru ale aktivní prostředí má tvořené diskem, jehož výška je cca několik desetin milimetru a průměr je cca do 10 mm. Disk je zároveň zadním zrcadlem optického rezonátoru. Chladicí prsten udržuje konstantní teplotu (viz obr. 7) Vlnová délka má hodnotu cca 1 030 nm. Rovný teplotní profil po celém disku poskytuje laseru výkon až 16 kW s účinností až cca 30% což má pozitivní vliv na nižší provozní náklady ve výrobě. Dosahuje se také kvalitního, úzkého (cca \varnothing 0,2 mm) výstupu svazku do optického konektoru. Životnost laseru je ale na nižší úrovni ve srovnání s vláknovým laserem [19, 26].



Obr. 7 Schéma diskového laseru [19].

Například diskové lasery firmy Trumpf jsou vybaveny světlovaným kabelem s průměrem $\geq 50 \mu\text{m}$, který poskytuje využití v procesech jako je řezání, svařování, povrchové svařování nebo povrchové úpravy. Uplatnění proto nachází v řadě odvětví např. v letectví, kosmonautice, automobilovém a subdodavatelském průmyslu [19, 26].

Mezi nejznámější světové výrobce diskových laserů patří společnost [23]:

- Trumpf

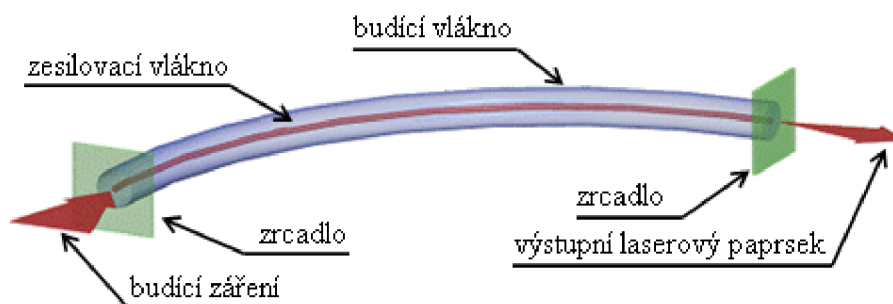
2.4 Vláknový laser

Jedná se o jeden z nejmodernějších typů pevnolátkových laserů. Laserový svazek je veden v dlouhém zesilovacím vláknu, které je dotované budícím vláknem čerpající LED diody z budícího zařízení. Dutinu laseru tedy rezonátor tvoří Braggovy mřížky anebo je konstruován dielektrickými zrcadly (viz obr. 8). Dají se rozdělit dle pracovního režimu na kontinuální (CW), pulsní nebo kvazipulsní (QCW). Výhodou tohoto laseru je jeho jednoduchost, robustnost, možnost zvýšení výkonu (až na cca 80 kW) lepší účinnosti čerpání (30-35%) pomocí kombinace více zesilovacích vláken a také možnosti prodloužení těchto vláken až na několik metrů, s průměrem 50-300 μm . Životnost se pohybuje okolo 100 000 hodin. V případě Nd:YAG laserů má vlnová délka hodnotu 1,07 μm , u jiných typů laserů se liší [1, 19, 25, 27, 28].

Laserový svazek se vyznačuje velkou kvalitou, dokáže být fokusován na velice malý průměr. Nízkými provozními náklady a takřka nulovými náklady na údržbu. Další výhodou je rozložení tepla v celé délce vlákna, tím nehrozí snížení jeho kvality. Chlazení je pomocí vody nebo vzduchu. Uplatňuje se pro přesné řezání, vrtání, gravírování, v chirurgii nebo také v telekomunikační technice [1, 19, 25, 27, 28].

Mezi nejznámější světové výrobce vláknových laserů patří tyto společnosti [23]:

- IPG Photonics,
- SPI Lasers.
- Rofin.



Obr. 8 Schéma vláknového laseru [27].

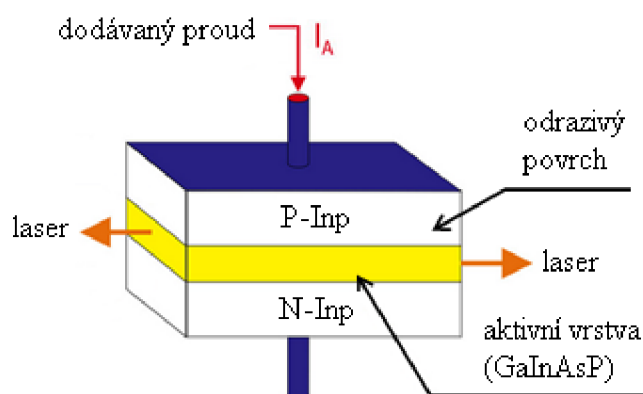
2.5 Diodový laser

Laserové záření je u tohoto diodového (polovodičového) laseru generováno v polovodiči typu (GaAs, AlGaAs) v P-N přechodu procházejícím elektrickým proudem viz obr. 9. Seskupením řady laserových diod do sloupců a bloků se dosahuje požadovaného výkonu, který se pohybuje v rozmezí od jednotek mW až po cca 15 kW a vlnová délka na hodnotě okolo 1000 nm. Mezi výhody patří účinnost, která je mezi 50 – 60 %, dále nízké investiční a provozní náklady, velmi malé rozměry, nízká hmotnost a dlouhá životnost.

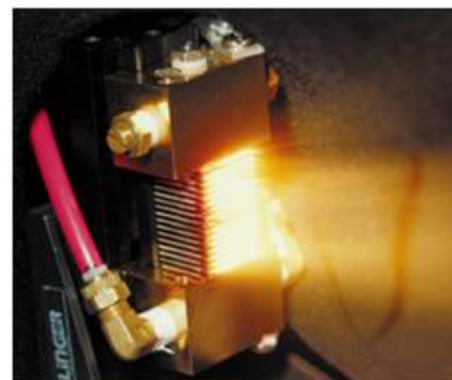
Ačkoliv má poměrně vysoký výkon jejich nevýhodou je důsledkem velké rozbíhavosti nižší kvalita výstupního laserového svazku. Na obr. 10 je ukázka moderního diodového Stack laseru. Skládá se ze souboru diod a může být celkem složitě fokusován do jednoho místa. Nicméně tento laser nachází v průmyslu poměrně široké uplatnění, mezi které patří navařování, kalení, nanášení vrstev, řezání plastů, stereolitografie a svařování tvarově složitých celků v automobilovém průmyslu, kde se laser díky svým kompaktním rozměrům umístí na rameno robota. Dále je lze využít například v CD/DVD přehrávačích nebo také laserových tiskárnách [1, 19, 24, 25, 29].

Mezi nejznámější světové výrobce diodových laserů patří tyto společnosti [23]:

- Laserline,
- Dilas.
- Rofin.



Obr. 9 Schéma diodového laseru [30].

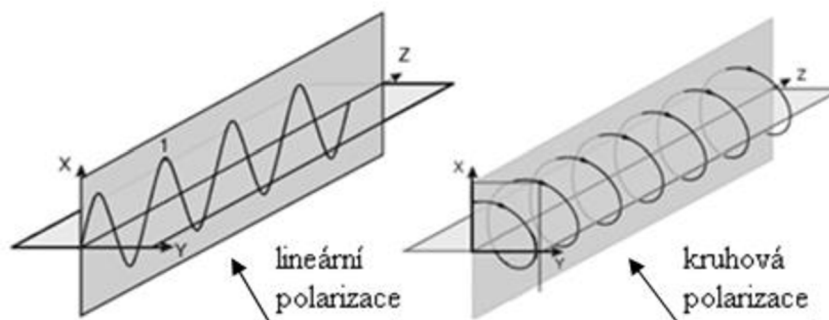


Obr. 10 Stack diodový laser [31].

2.6 Vlastnosti laserového paprsku z hlediska jeho technických vlastností

Polarizace světla

Lineární polarizace světla znamená, šíření světelné vlny v jedné rovině a také jedním směrem (viz obr. 11). Aby se dosáhlo kvalitního řezu bez otřepů je důležité, aby směr řezání odpovídal polarizační rovině. Proto je tato metoda vhodná pro aplikace ve směru řezu, např. pro řezy trubek do sekcí. V případě kruhově polarizace světla, zůstává kvalitní řez ve všech směrech řezání konstantní. Toto lze dosáhnout pohybem světelné vlny ve spirále kolem osy směru šíření [14].



Obr. 11 Schéma lineární a kruhové polarizace [14].

Tvar laserového paprsku– mód

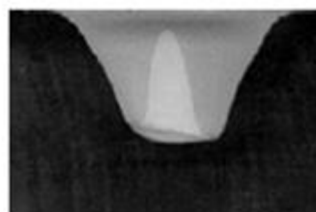
Základní tvar laserového paprsku určuje geometrická konstrukce rezonátoru a také závisí na nastavení zrcadel. V podélném řezu má svazek k ose symetrické rozložení intenzity. Pro CO₂ lasery jsou určeny tyto dva základní mody laserového paprsku TEM₀₀ a TEM₀₁ [14, 28].

Mód-TEM₀₀

Rozložení intenzity tohoto módu odpovídá tvaru Gaussovy křivky. Na obr. 12 je vidět nastřelení módu do plexiskla (laserový výboj paprsku do průhledného materiálu), kde je vidět, že na ose svazku je intenzita záření největší a směrem od osy svazku intenzita klesá. Tvar módu je orientační pro CO₂ lasery s výkonem od 700 W do 3500W pro laserové řezání [14, 28].



Obr. 12 Základní mód TEM₀₀ [14].



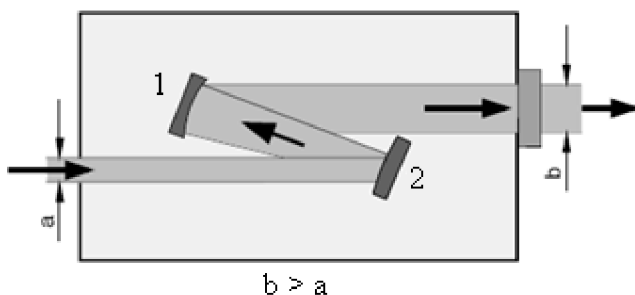
Obr. 13 Prstencový mód TEM₀₁ [14].

Mód-TEM₀₁

Tento mód se nazývá prstencový. Na obrázku č. 13 je vidět, že na ose svazku je intenzita záření nulová a největší intenzita záření je rozložena v prstencovitém poli. Tento tvar módu lze použít pro laserové řezání nebo vrtání u laserů s výkonem od 3000 W do 7000 W [14, 28].

Divergence paprsku

Znamená rozšiřování paprsku s narůstající vzdáleností od laserového zdroje. Toto rozšiřování může mít za následek negativní rozptyl, který není žádoucí. Proto se mezi zdroj paprsku a řeznou hlavu umísťuje teleskop (viz obr. 14), který způsobí rozšíření paprsku až na dvojnásobek. Teleskop obsahuje dvě zrcadla, jedno konkávní a druhé konvexní. Tím, že dojde k rozšíření paprsku až na dvojnásobný průměr, se docílí menšího rozptylu a zároveň větší rovnoběžnosti [14].

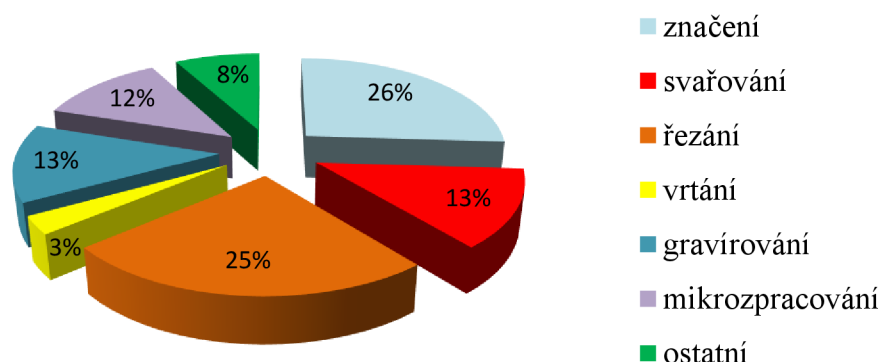


- 1 – Konkávní zrcadlo,
- 2 – Konvexní zrcadlo,
- a – Průměr paprsku před vstupem,
- b – Průměr paprsku po výstupu.

Obr. 14 Schéma rozšíření paprsku zrcadlovým teleskopem [14].

3 POUŽITÍ LASERU VE STROJÍRENSTVÍ

S laserem je spojen významný pokrok také v oblasti strojírenské. Díky jeho pomoci je možné významně zvýšit kvalitu, technickou úroveň a produktivitu práce. Lze také dosahovat takových parametrů výrobků, které by šly stěží dosáhnout odlišnou technologií. Od svého vzniku se laser uplatnil v mnoha technologiích v této oblasti, které lze vidět na obr. 15 [16, 32].

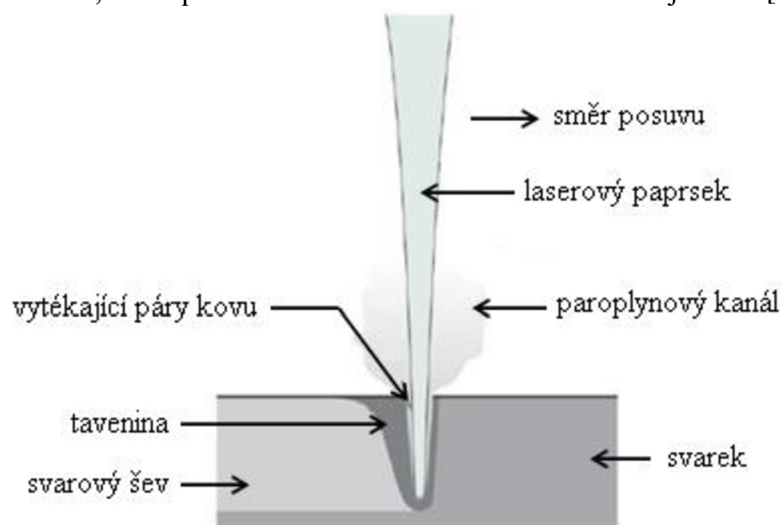


Obr. 15 Procentuální využití určitých technologií ve strojírenství pomocí laseru [16].

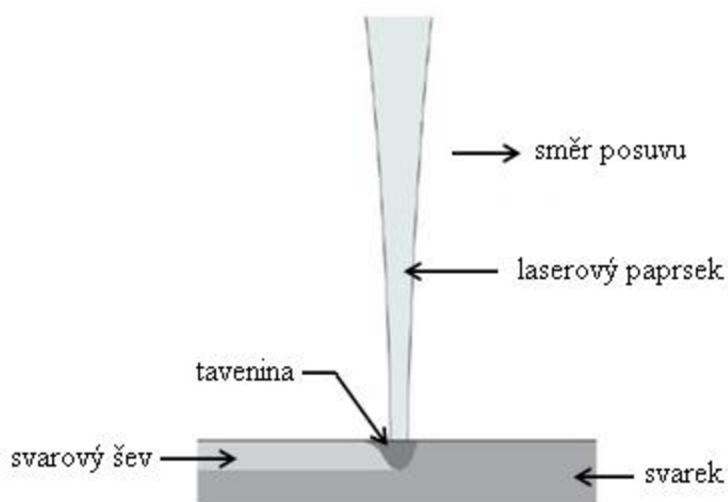
3.1 Laserové svařování

Různé možnosti trvalých spojů materiálů nabízí tato moderní technologie. Používá se u součástí vyrobených nejčastěji z kovů, kde se dosahuje nejvyšší kvality laserového spoje. Podle hustoty výkonu laserového svazku je lze rozdělit na penetrační (hluboké), indukční [19, 26, 33, 34].

Penetrační svařování je metoda, při které má laserový paprsek poměrně vysokou výkonovou hustotu. Během tohoto procesu (viz obr. 16) nejprve vzniká úzký otvor tvaru klíčové díry (keyhole), která je vyplněna párou kovu a okolo taveninou. Po uvedení do pohybu se úzký otvor vyplní taveninou a vytvoří se úzký, až 25 mm hluboký šev stejnoměrné struktury. Výhody této metody jsou vysoká účinnost a vysoké rychlosti svařování s tím souvisí menší tepelně ovlivněná oblast a menší deformace. Využívá se pro svary velkých hloubek, nebo pro svařování více vrstev materiálu najednou [19, 26, 33, 34].



Obr. 5 Schéma hlubokého laserového svařování [26].

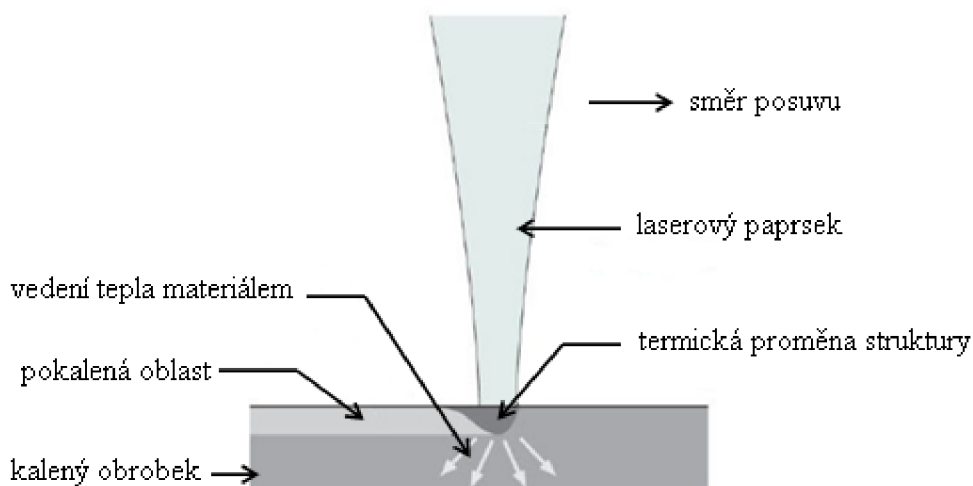


Obr. 67 Schéma indukčního laserového svařování [26].

Na obr. 17 je schéma indukčního svařování, při kterém dochází vlivem laserového paprsku k tavení materiálu a následnému zformování struktury materiálu a vytuhnutí ve svar, který má dobré mechanické vlastnosti. Metoda se používá v případech omezené hloubky průvaru materiálu. U této metody je šířka svaru vždy větší než jeho hloubka (cca desetiny mm). V případě, že není vzniklé teplo dostatečně rychle odváděno, stoupne teplota obrábění nad teplotu odpařovací, tak vznikne kovová pára, která způsobí rapidní zvětšení hloubky svaru a proces se změní na hluboké svařování. Využití indukčního svařování se uplatňuje v elektronice pro výrobu miniaturních součástí [19, 26, 33, 34].

3.2 Laserové kalení

Jde o způsob tepelného zpracování povrchu materiálů směřující k zvýšení jeho životnosti. Laserový paprsek působí na povrch kaleného materiálu (viz obr. 18), který se zahřívá na teplotu těsně pod bod tání (cca 900 – 1400 °C) tím dochází k austenitizaci materiálu. Plynulým posunováním paprsku se postupně ohřívá povrch ve směru posuvu. Teplo zahřátých míst se odvádí do studeného obrobku. To má za následek rovnoměrné vyrovnání vnitřních teplot. Nedochází tak téměř k vnitřním pnutím a praskáním. Hloubka povrchového kalení je 0,1 – 1,5 mm. Pravidlem by mělo být, že tloušťka stěny je 10 x

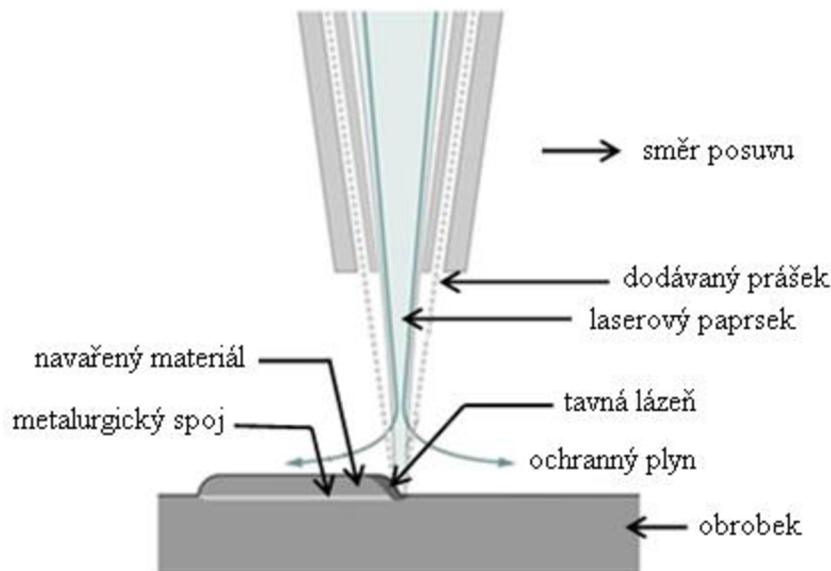


Obr. 18 Schéma laserového kalení [26].

silnější než hloubka kaleného obrobku, kvůli zajištění rychlého odvodu tepla. Výhodou této metody je možnost zakalení pouze u určitých míst, kde je zapotřebí zvýšená pevnost. Není zde nutnost použití jako při běžném způsobu kalení potřebných lázní a kalících médií [26, 35].

3.3 Laserové navařování

Používá se pro opravu nebo modifikaci stávajících obrobků nebo také k zušlechťování povrchu. Podle pracovního úkolu se navařování dělí na manuální nebo automatické. V případě automatického navařování (viz obr. 19) je přídavný materiál (kovový prášek) strojně nanášen na obrobek ve vrstvách a laserovým paprskem dochází k jeho navařování na základní materiál. Jde o velmi pevný svarový spoj. Kovová vrstva, která vznikne po vychladnutí lze následně mechanicky opracovávat. Takto lze vytvořit několik totožných nebo odlišných kovových vrstev. Laserové navařování se využívá například pro opravy a prodlužování životnosti velmi namáhaných součástí strojů. Například u zubů na bagrech nebo lopatky od proudových strojů [26, 36].



Obr. 7 Schéma laserového navařování [26].

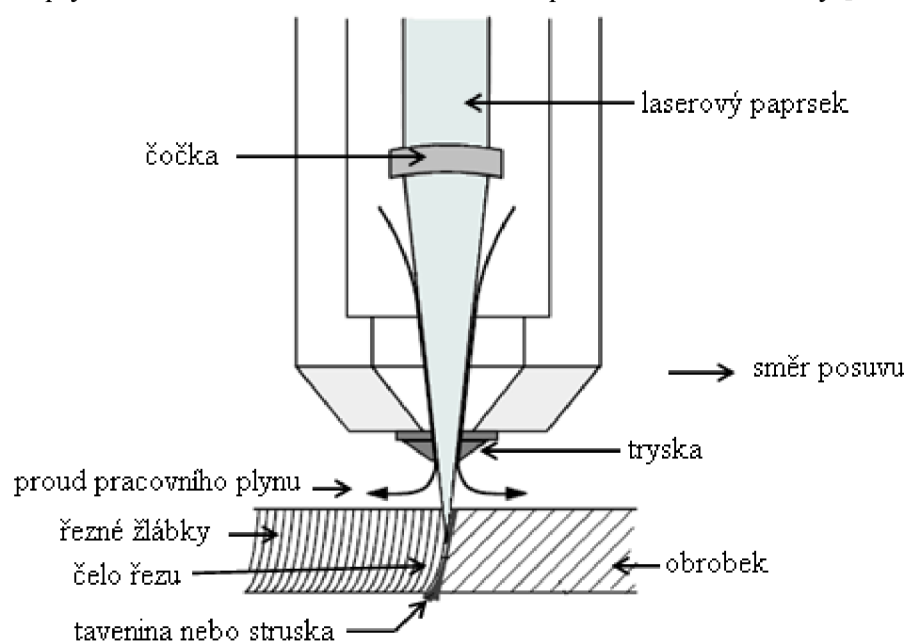
3.4 Laserové řezání

Jak již bylo výše uvedeno, laserové řezání patří v dnešní době k nejčastěji využívaným technologiím ve strojírenství. Na obr. 20 je znázorněné schéma laserového řezání, kde silně fokusovaný laserový paprsek nejprve vysoce zahřeje obrobek, tím dojde následně k jeho roztavení nebo odpaření. Po proniknutí celé tloušťky materiálem začne proces řezání. Pohyb laserového paprsku po obrobku je zajištěn vytvořeným CNC programem, který umožňuje vytvářet složité křivkové řezy na ploše nebo v prostoru. Laserovým pohybem po obrobku dochází k roztavení materiálu a proud pracovního plynu obvykle zajišťuje jeho vyfouknutí směrem dolů ze štěrbinu řezu. Vzniká tak velmi malá šířka řezu s minimálním tepelně ovlivněným pásmem v obrobku. Také vznikají jen minimální deformace obrobku, neboť při tomto dělení nedochází k mechanickému působení na obrobek [26, 32, 37].

Lze řezat a vytvářet otvory v kovových i nekovových materiálech. V mnoha případech s vysokou přesností u malých součástí až po kvalitní 20 mm řez ocelového plechu. Stále je tato metoda dělení konkurence schopná v porovnání s ostatními technologiemi dělení [26, 32, 37].

Řezací hlava - konstrukce

Optickou soustavou zrcadel je laserový paprsek přiváděn z rezonátoru do řezací hlavy laseru, kde se nachází zaostřující čočka a řezací tryska. Podmínka čočky je, že musí být průzračná pro vlnovou délku daného laserového paprsku. V případě nečistot nacházejících se na povrchu čočky, dojde k absorpci paprsku a k zahřívání čočky, což bude mít za následek v nejhorším případě následné zničení čočky spolu s tím může dojít k uvolnění jedovatých plynů do okolí. Pro CO₂ laser se běžně používání ZnSe čočky [14, 22, 26, 38].



Obr. 8 Schéma laserového řezání [26].

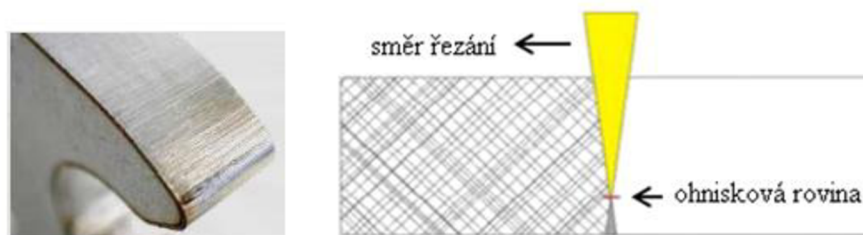
Řezací tryska slouží k přivedení laserového paprsku a řezného plynu do místa řezu v materiálu. Množství a tvar vystupujícího proudu plynu určuje průměr trysky. Chlazení trysky je zabezpečeno řezným plynem. Čím silnější je materiál, tím musí být průměr laserového paprsku větší. Běžně se v praxi používají průměry trysek od 0,6 mm do 3 mm [14, 22, 26, 38].

Laserové řezání je možné rozdělit do níže uvedených kategorií:

3.4.1 Tavné řezání

Při tomto způsobu řezání (viz obr. 21) dochází laserovým paprskem k natavení materiálu a inertním (netečným) plynem k jeho vyfouknutí z řezné spáry. Inertním plynem, který je vháněn do řezné spáry tlakem 2 - 20 barů je dusík N₂. Metoda je vhodná pro řezání korozivzdorných ocelí nebo barevných kovů. Dosahuje se vysoké kvality řezu, díky tomu, že inertní plyn chemicky nereaguje s roztaveným kovem v řezné spáře. Inertní plyn také izoluje hranu řezu od kontaktu se vzduchem, tudíž neoxiduje a nemusí se následně obrábět.

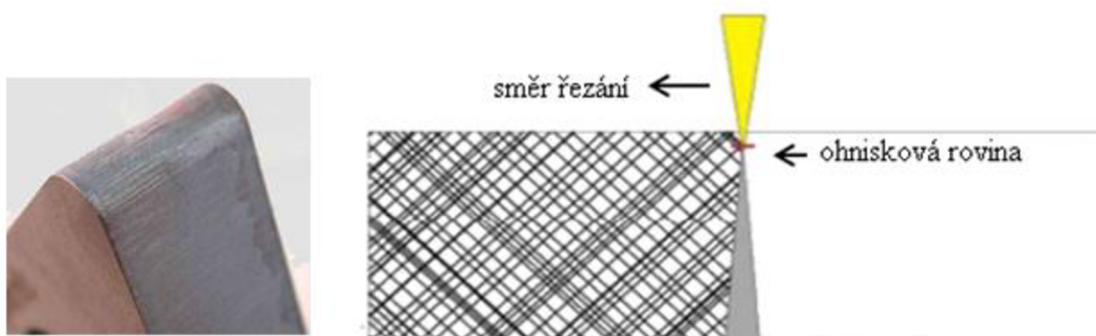
V případě řezání silnějších plechů a při zapichování je řezná rychlost nižší než v případě oxidační metody. Další nevýhodou je vysoká spotřeba řezného plynu [26, 39, 40].



Obr. 21 Poloha ohniskové roviny pro tavné řezání [40].

3.4.2 Oxidační řezání

Jedná se o standardní metodu pro dělení konstrukčních uhlíkatých ocelí. Řezným plynem je v tomto případě kyslík O_2 . Pod tlakem 0,6 - 5 barů je kyslík vháněn do štěrbině řezu, kde dochází k exotermické reakci kyslíku s roztaveným povrchem kovu, kterým se uvolňuje velmi mnoho tepla do okolí řezu. Laserový paprsek následně taví materiál (viz obr. 22). Tento způsob řezání umožňuje dosahování vysoké řezné rychlosti [26, 39, 40].

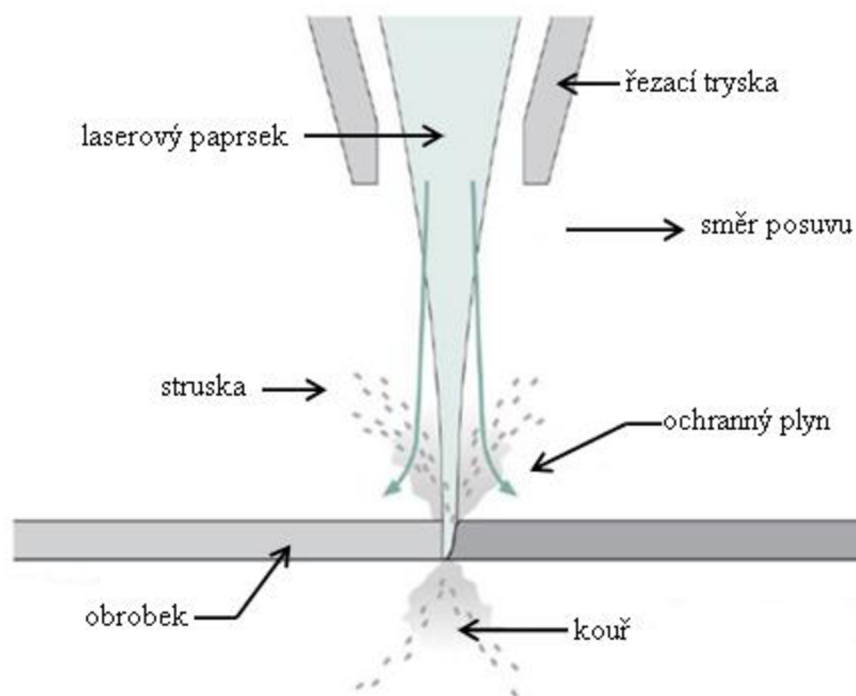


Obr. 22 Poloha ohniskové roviny pro oxidační řezání [40].

Dále tato metoda umožňuje řezání velmi silných plechů (až 30 mm). Důsledkem vysoké řezné rychlosti, může docházet ke zhoršení kvality řezu, vyšší drsnosti, vzniku okují a větším tepelně ovlivněným pásmům. Způsob jak ovlivnit tento negativní efekt může být regulace výkonu laseru, snížení řezné rychlosti nebo také přechod laseru na pulzní provoz [26, 39, 40].

3.4.3 Sublimační řezání

Touto metodou dochází k úběru materiálu odpařováním pomocí laseru. Laserový paprsek dosahuje vysoké energetické hodnoty, aby mohlo dojít k odpaření materiálu. Tím vznikají páry z materiálu, které vytváří v štěrbině řezu vysoký tlak. Řezným plynem (argon nebo dusík) je následně materiál vymrštěn směrem nahoru a dolů (viz obr. 23). Potřebný tlak je asi jen 1 – 3 bary. Řezné plyny zabráňují oxidaci řezného materiálu. Je zde vyžadováno pečlivé nastavení optiky v závislosti na řezané tloušťce materiálu. Řezná rychlost je nepřímo úměrná odpařovacímu teplu materiálu a přímo úměrná rychlosti proudění řezného plynu. Tím, že téměř nevzniká žádná tavenina, jsou výsledkem řezu hladké plochy. Uplatnění tato metoda nachází u jemných řezů nekovových materiálů, například pro tenké fólie nebo stenty v lékařské technice [26, 32, 39, 40].



Obr. 23 Schéma sublimačního řezání [26].

3.4.4 Laserové řezání stlačeným vzduchem

Další alternativní variantou je řezání stlačeným vzduchem. Vzduch se skládá ze 78 % dusíku, 21 % kyslíku a 1 % vzácných plynů. Podmínkou je tlak vzduchu cca 5 až 6 barů. U řezání uhlíkových ocelí dochází k potlačení exotermické reakce oproti použití optimálního média (čistého kyslíku). To má za následek nižší řeznou rychlost a kvalitu řezu. Může docházet ke vzniku otřepů na spodní hraně materiálu. U řezání hliníku vzniká zoxidovaná řezná plocha, která je potřeba následně opracovat. Použitím stlačeného vzduchu se tedy nedosahuje kvalitní řezné plochy a ani vysoké řezné rychlosti [14, 41].

3.4.5 Parametry ovlivňující proces laserového řezání

Na výslednou kvalitu řezu mají vliv níže uvedené parametry [32, 42].

- Výkon laseru,
- Řezná rychlost,
- Časový režim paprsku,
- Frekvence,
- Vlnová délka,
- Duty (střída frekvence),
- Poloha ohniska laserového svazku,
- Druh plynu,
- Pracovní tlak plynu,
- Vzdálenost trysky nad materiálem,
- Parametry ovlivňující ostrý roh.

Výkon laseru

Jedná se o regulovatelný parametr, neboť síla potřebná pro řezání, závisí na typu a tloušťce řezaného materiálu, proto výkon laseru musí být vždy upraven. Hodnota výkonu se uvádí v jednotkách wat [W]. Podle velikosti vneseného množství tepla do místa řezu dochází k ovlivnění struktury povrchu. Čím je množství tepla vyšší, tím je řez hrubější [22, 29, 43].

Na obr. 24 jsou ukázky řezu s velmi nízkým, optimálním a velmi vysokým výkonem.



Obr. 24 Ukázka řezů s proměnlivým výkonem laserového paprsku [44].

Řezná rychlost

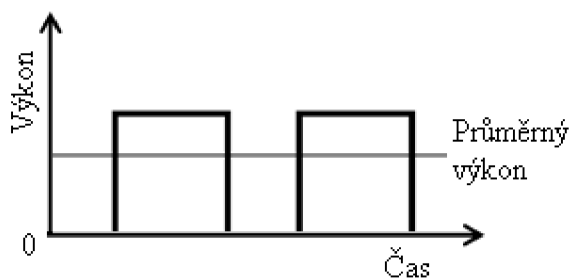
Nepochybně jako výkon laseru tak i řezná rychlost je parametr, který se musí přizpůsobit tloušťce a typu řezaného materiálu. Řezná rychlost se uvádí v jednotkách metr za minutu [m/min]. V případě rovných řezů bude řezná rychlost podstatně vyšší než u geometricky složitých a malých otvorů. Chybně nastavená řezná rychlost může způsobit nežádoucí drsnost nebo tvorbu otřepů v místě řezu. V případě stejného výkonu laseru s rostoucí tloušťkou materiálu klesá řezná rychlost. Na obr. 25 jsou ukázky řezu s velmi nízkou, optimálním a velmi vysokou řeznou rychlostí [38, 44].



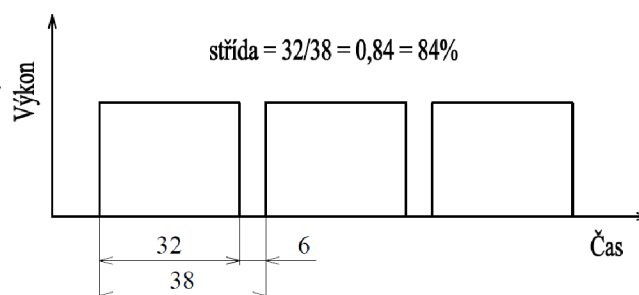
Obr. 25 Ukázka řezů s proměnlivou řeznou rychlostí [44].

Časový režim paprsku

Obvykle se dělí na kontinuální režim a pulzní. Kontinuální znamená, že výstupní výkon laseru je konstantní. U pulzního režimu obr. 26, je výkon dávkován v pravidelných intervalech. Tento režim umožňuje plynulé nastavení výkonu laseru pro splnění konkrétních úkolů, například vrtání a řezání ostrých hran kontur [38].



Obr. 26 Pulzní režim laseru [23].



Obr. 27 Duty – střída frekvence 25% a 84% [23].

Frekvence

Udává počet opakování těchto pulzů výkonů za daný časový úsek. Jednotka frekvence je Hertz [Hz] [22].

Vlnová délka

Definuje absorpci laserového světla obrobkem. Různé typy materiálu prokazují různé stupně absorpce pro odlišné vlnové délky. Míra absorpce také závisí na různých aspektech, jako je úhel dopadu, množství dopadající laserového světla na povrch materiálu nebo na teplotě. Vlnová délka u CO₂ laserů má hodnotu 10,6 mikrometrů [14].

Duty - střída frekvence

Střída znamená poměr podílu doby, po kterou je laserový svazek šířen z rezonátoru k celkové délce doby cyklu. Většinou je tento poměr uváděn v procentech. Na obr. 27 ukázka nastavení střídání – frekvence. Snížení parametru střídání - frekvence umožňuje dosažení vyšší řezné rychlosti, díky dostatku času chladnutí mezi jednotlivými cykly [23, 38].

Poloha ohniska laserového svazku

Aby mohlo dojít k dělení materiálu, musí být laserový svazek přiveden až do místa samotného řezu. Laserový svazek má schopnost být fokusován, což má velký vliv na samotnou kvalitu řezu. V případě kruhově symetrického svazku je definována veličina Beam Parameter Product (BPP) určující jeho kvalitu [14, 19, 45].

$$BPP = M^2 \cdot \frac{\lambda}{\pi} \quad (1)$$

kde: M^2 [-] - faktor kvality svazku,
 λ [m] - vlnová délka svazku,
 π [-] - matematická konstanta.

Čím vyšší je hodnota vlnové délky tím je vyšší hodnota BPP, to znamená větší průměr výstupního laserového paprsku. Fokusace paprsku znázorněná na obr. 28 probíhá přes průchod optické čočky, která je chlazená vzduchem na jejím povrchu. Například Pro Nd:YAG lasery se používá borosilikátové korunové sklo BK7. Ohnisková vzdálenost určuje vzdálenost mezi čočkou a ohniskovou rovinou. Čím je menší ohnisková vzdálenost

F, tím je menší hloubka ostrosti a také průměr výstupního laserového paprsku D_{foc} což znamená silnější zaostření paprsku v ohniskové rovině [14, 19, 45].

Výpočet průměru výstupního fokusovaného laserového paprsku:

$$D_{\text{foc}} = 4\text{BPP} \cdot \frac{F}{D_o} \quad (2)$$

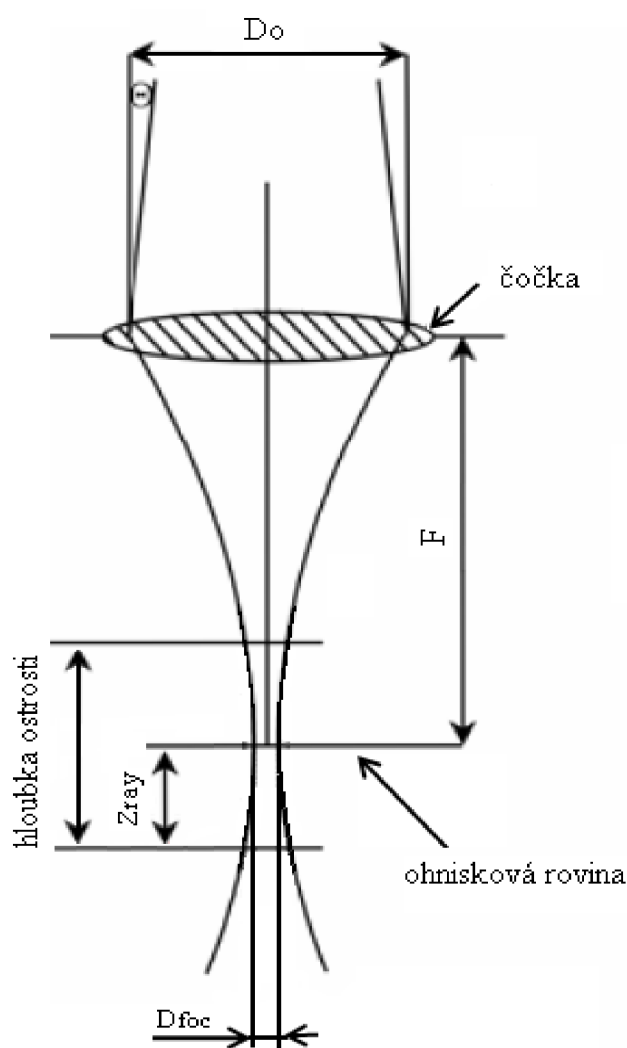
kde:

F ["] – ohnisková vzdálenost,

D_o [mm] – průměr vstupního laserového svazku.

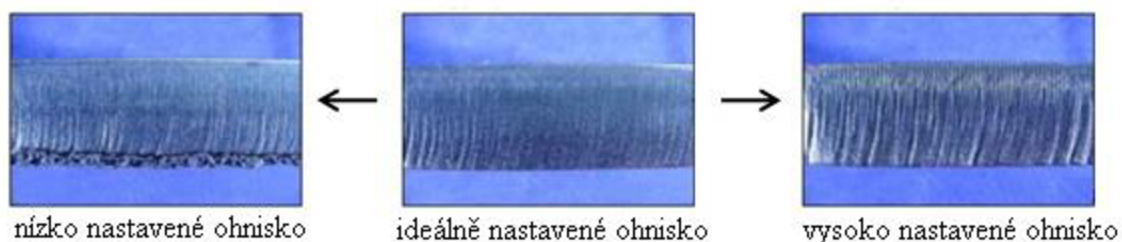
Výpočet hloubky ostrosti:

$$z_f = \frac{D_{\text{foc}}^2}{2\text{BPP}} \quad (3)$$



Obr. 28 Fokusace laserového svazku [45].

Hloubka ostrosti je přímo úměrná druhé mocnině výstupního průměru laserového paprsku. Typické velikosti čoček jsou 5, 7,5 a 10 palců. Na obr. 29 jsou ukázky řezů s nízko, ideálně a vysoko nastavenou polohou ohniska [14, 19, 45].



Obr. 99 Ukázka řezů s proměnlivým nastavením ohniska [44].

Druh plynu

Další parametr, který ovlivňuje kvalitu řezu je druh řezného plynu, což se úzce týká použité řezné metody jako je oxidační, tavná nebo sublimační. V případě použití kyslíku, dochází ke vzniku filmu oxidů na řezných plochách. Čistota kyslíku by měla být 99,95 %. Použitím inertních plynu jako je dusík, argon a helium nedochází ke vzniku filmu oxidů. Dusík se využívá v případě řezání korozivzdorné oceli tavným způsobem. Čistota dusíku by měla být 99,999 %. Výjimkou je materiál z titanu, zde se musí použít argon jako řezací plyn. Čistota argonu je 99,996 %. Tento plyn spolu s vysokým tlakem zajistí řezné hrany bez otřepů do značné míry [14, 22].

Pracovní tlak plynu

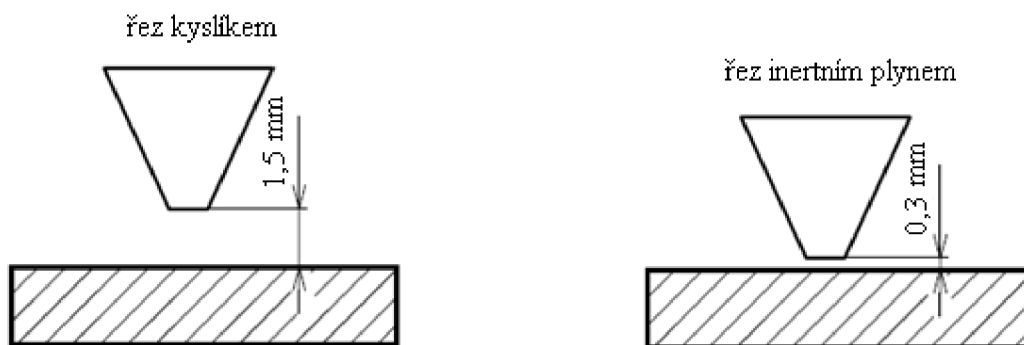
Nejenom druh ale i tlak plynu ovlivňuje kvalitu, drsnost řezu a tvorbu otřepů proto je potřeba správně nastavit v souvislosti s tloušťkou a způsobem řezaného materiálu. Základní jednotka tlaku je v Pascal [Pa] ale může se uvádět i v barech. Tlak plynu u řezného plynu kyslíku se pohybuje až do max. 0,6 MPa, u dusíku se pohybuje tlak mezi 0,2 – 2 MPa. Tlak plynu pro řezání se dělí na nízkotlaký do 0,01 MPa, středotlaký do 0,05 MPa a na vysokotlaký do 2 MPa. Na obr. 30 jsou ukázky řezů s velmi nízkým, ideálním a velmi vysoko nastaveným pracovním tlakem [22].



Obr. 30 Ukázka řezů s proměnlivým nastavením tlaku plynu [44].

Vzdálenost trysky nad materiálem

Udržování správné vzdálenosti trysky od materiálu je velmi důležité, aby bylo dosaženo optimálního proudění řezného plynu do řezné spáry viz obr. 31. Případné odchylky vzdálenosti i desetiny milimetru mohou mít vliv na výslednou kvalitu povrchu řezu. Tyto odchylky jsou neustále kontrolovány snímačem. Případný dotyk trysky s materiálem je nebezpečné z důvodu vzniku závady na trysce a také z poškození čočky rozstříkem řezaného kovu. Obecně platí při řezání kyslíkem, že vzdálenost mezi tryskou a materiálem je 1,5 mm. U řezání inertními plyny je vzdálenost doporučuje 0,3 - 0,5 mm [22, 29, 44].



Obr. 31 Schéma vzdáleností při řezání kyslíkem a inertním plynem [44].

Parametry ovlivňující ostrý roh

Vnesené teplo je to co negativně ovlivňuje roh během pálení geometricky komplikovaných výpalků. To má za následek nekvalitní strukturu řezné hrany. Z tohoto důvodu se například sníží výkon laseru a řezná rychlost během pálení ostrých rohů. Toto probíhá většinou automaticky pomocí ovládacího programu. Nebo dalším způsobem jak se vyhnout těchto problémů je manuální vložení smyčky do místa rohu [46].

Parametry vpichu

Ještě před samotným řezáním konkrétního dílce v plechu je zapotřebí, aby laser vytvořil startovací vpich. V místě vpichu laserový paprsek prochází skrz celou tloušťku materiálu, kde dojde k velkému narušení povrchu řezu viz obr. 32. Je tedy důležité při vytváření vpichů v silných materiálech měnit výkon laseru a řeznou rychlost [46].



Obr. 32 Ukázka vpichu [22].

Výhody a nevýhody laserového řezání jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Tab. 1 Výhody a nevýhody při řezání laserem [38, 47].

Výhody	Nevýhody
Vysoká přesnost řezaných dílů a slabých a středních tloušťek materiálu.	Vysoké investiční náklady.
Schopnost zaostřit paprsek do jednoho bodu, čímž se dosáhne vysoké intenzity.	Provozní náklady.
Velmi malé přivedené teplo, téměř žádné deformace obráběného materiálu.	Snížení stability laserového paprsku u řezání lesklých povrchů.
Lze řezat různé typy materiálů.	Menší účinnost CO ₂ laserů.
Vysoká řezná rychlost.	
Malá šířka řezné spáry (0,2 - 0,4 mm).	

4 VOLBA MATERIÁLŮ

Na realizaci experimentu této diplomové práce, byly použity níže detailně popsané dva materiály. První materiál je od výrobce TATA STEEL ocel S355MC, a druhý je od výrobce SSAB ocel Laser 355 MC plus.

4.1 Materiál TATA STEEL S355MC

První materiál je obdobou ocele 11 523 (ČSN 41 1523). Tato konstrukční, uhlíková, jemnozrnná ocel je vhodná k laserovému řezání. Vhodná pro svařování. Pevnost je garantována do 0°C. Použití pro statické, ale i dynamicky namáhané konstrukce, nebo pro základové desky lisovacích nástrojů a pro méně namáhané okrajové desky vstřikovacích forem. Níže je uvedena tabulka č. 2 chemických a tabulka č. 3 mechanických vlastností této ocele [48, 49].

Tab. 2 Chemické složení materiálu S355MC dle normy [49].

Chemické složení dle normy				
C [max %]	Si [max %]	Mn [max %]	P [max %]	S [max %]
0,12	0,5	1,5	0,025	0,02

Tab. 3 Mechanické vlastnosti materiálu S355MC [49].

Mechanické vlastnosti dle normy		
Pevnost v tahu R _m [MPa]	Pevnost na mezi kluzu R _{p0,2} [MPa]	Tažnost A ₈₀ [%]
430 - 550	min. 355	23

4.2 Materiál SSAB Laser 355 MC Plus

Jedná se o konstrukční, jemnozrnnou ocel, která je obzvláště vhodná pro laserové nebo plazmové řezání. Oproti výše uvedenému materiálu tato značková ocel vyniká vyšší rychlostí řezání a kvalitou řezu. Označení MC znamená termomechanické válcování. Níže je uvedena tabulka č. 4 chemických a tabulka č. 5 mechanických vlastností této ocele [50].

Tab. 4 Chemické složení materiálu SSAB Laser 355 MC Plus [50].

Chemické složení dle normy				
C [max %]	Si [max %]	Mn [max %]	P [max %]	S [max %]
0,12	0,03	1,5	0,02	0,015

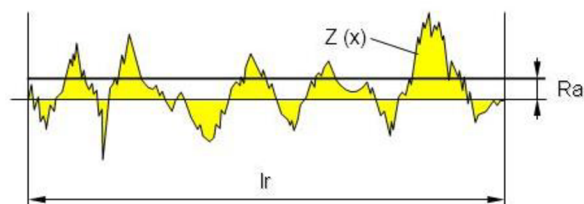
Tab. 5 Mechanické vlastnosti materiálu SSAB Laser 355 MC Plus [50].

Mechanické vlastnosti dle normy		
Pevnost v tahu R _m [MPa]	Pevnost na mezi kluzu R _{p0,2} [MPa]	Tažnost A ₈₀ [%]
430 - 530	min. 355	24

5 KVALITA A DRSNOST POVRCHU

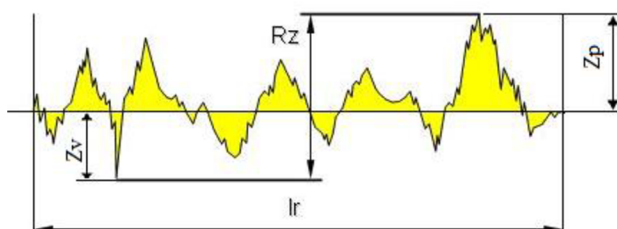
Podle normy ČSN EN ISO4287 můžeme u povrchu součásti určit podle rozteče nerovností, zda je o složku s nejmenší roztečí – drsnost [R], s větší roztečí – vlnitost [W] nebo s největší roztečí, která se nazývá základní profil [P] [51, 52].

Střední aritmetická úchylka profilu R_a je definována jako průměr absolutních hodnot výšek profilu viz obr. 33. Nerovnosti jsou určeny celým rozsahem základní délky l_r [51, 52].



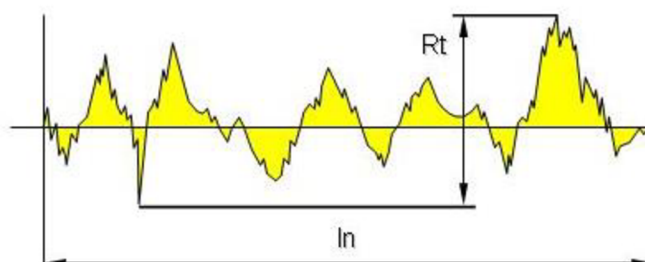
Obr. 33 Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a [53].

Alternativní mírou drsnosti povrchu je hodnota R_z , která definuje maximum výšky profilu v rozsahu základní délky l_r viz obr. 34. Je to součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu [51, 52, 53].



Obr. 34 Největší výška profilu R_z [53].

Celková výška profilu R_t představuje součet největšího výstupu profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky l_n viz obr. 35 [51, 52, 53].



Obr. 35 Celková výška profilu R_t [53].

5.1 Norma ČSN EN ISO 9013

Jedná se o mezinárodní normu, která se uplatňuje u materiálů vhodných pro laserové řezání, plazmové řezání a také pro řezání kyslíkovým plamenem a součástí této normy jsou geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti povrchu řezu [54, 55].

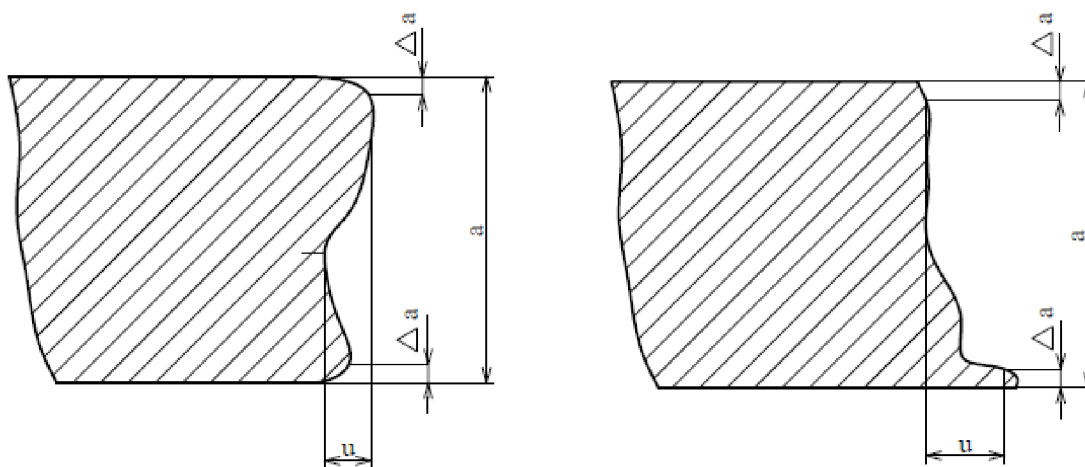
Platí pro řezy:

- laserem – od 0,5 – 40 mm,
- plazmou 1 – 150 mm,
- kyslíkovým plamenem od 3 – 300 mm.

Měření posuzovaných úseků řezů, se má provádět na kartáčovaných řezech, mimo oblasti kde se vyskytují vady a také na řezech které jsou očištěny od oxidů. Tyto úseky jsou definovány jako horní a dolní strana opracovávaného materiálu tepelným dělením. Také vzdálenost mezi měřicí přímkou a skutečným povrchem materiálu by měla být minimální. U tepelně dělených materiálů je kvalita povrchu řezu charakterizována úchylkou kolmosti a průměrnou výškou profilu Rz5 [54, 55].

5.2 Úchylka kolmosti

V případě měření úchylky kolmosti nebo také úchylky úhlové je měřená oblast zmenšena o vzdálenost Δa od horní a dolní hrany řezu viz obr. 36. Vzdálenost Δa znamená nastavení hrany řezu, která není započítaná. Kota a definuje tloušťku materiálu. Pokud je tloušťka materiálu menší jak 2 mm, musí být dopředu domluven postup měření [55].

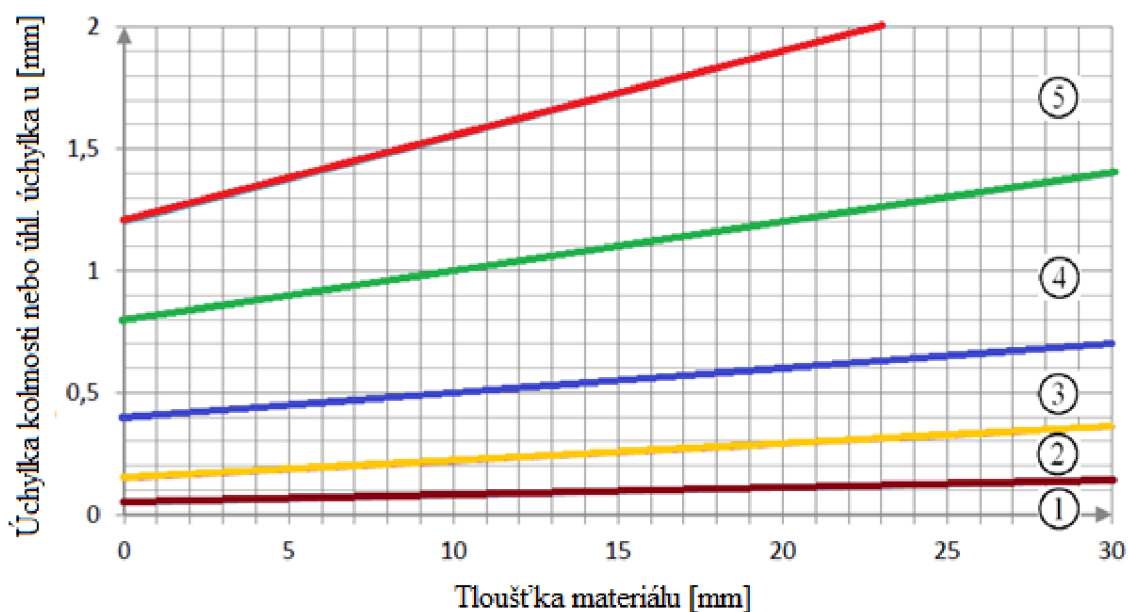


Obr. 36 Úchylky kolmosti u svislého řezu materiálem [55].

5.3 Průměrná výška prvků profilu Rz5

Rz5 je charakteristická hodnota průměrné výšky profilu mezi pěti nejvyššími a pěti nejnižšími hodnotami měřeného úseku. Hodnota Rz5 se stanovuje jen v omezeném úseku povrchu řezu, tam kde je maximální drsnost povrchu řezné tloušťky podle normy ISO 4288. U řezání laserem se měření nejčastěji realizuje v třetině od horní hrany řezu. Pokud je tloušťka řezu menší než 2 mm tak se měření provádí v polovině vzdálenosti tloušťky řezu. Mezní hodnota chyby je stanovena na hodnotu 0,002 mm pro elektrický dotkový hrotový přístroj pro souvislé snímání ve směru řezání [55].

Níže jsou uvedeny grafy a tabulky pro toleranční pole úchylku kolmosti nebo úhlové úchylky viz obr. 37 a také parametr Rz5 viz obr. 38 pro materiály do tloušťky 30 mm [55].



Obr. 10 Graf úchylky kolmosti nebo úhlové úchylky pro materiál do 30 mm [55].

V níže uvedené tabulce č. 6 jsou hodnoty tolerančních polí 1 – 5 pro úchylky kolmosti nebo úhlové úchylky.

Tab. 6 Úchylky kolmosti nebo úhlové úchylky [55].

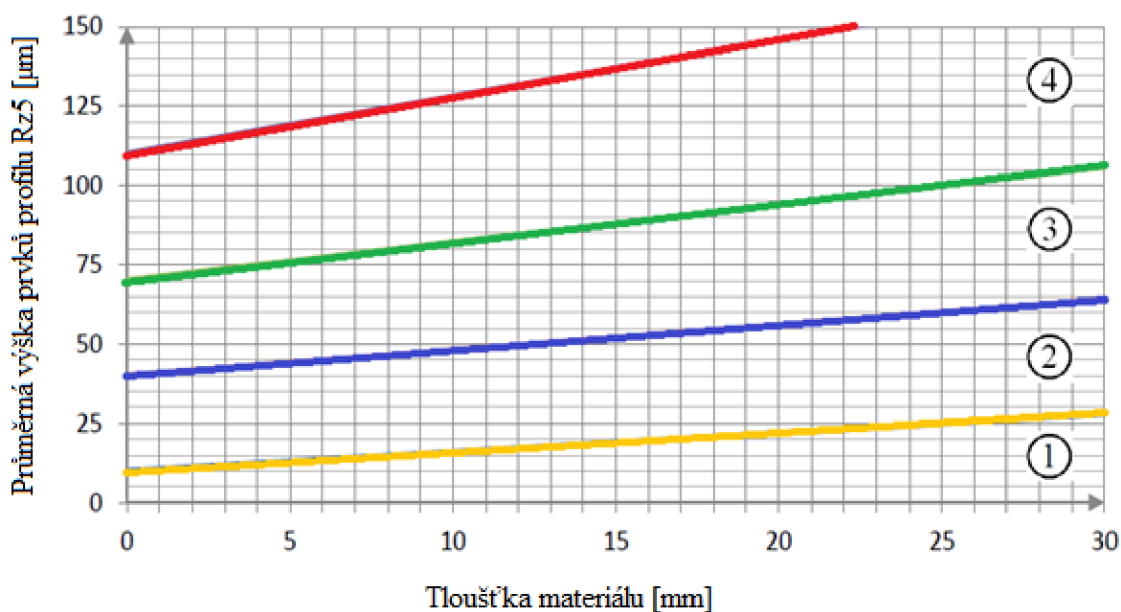
Toleranční pole	Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka - u [mm]
1	$0,05 + 0,003 * a$
2	$0,15 + 0,007 * a$
3	$0,4 + 0,01 * a$
4	$0,8 + 0,02 * a$
5	$1,2 + 0,035 * a$

kde: a [mm] - tloušťka materiálu,

V níže uvedené tabulce č. 7 jsou hodnoty tolerančních polí 1 – 5 pro průměrnou výšku prvků profilu Rz5.

Tab. 7 Průměrná výška prvků profilu Rz5 [55].

Toleranční pole	Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka - u [mm]
1	$10 + 0,6 * a$
2	$40 + 0,8 * a$
3	$70 + 1,2 * a$
4	$110 + 1,8 * a$

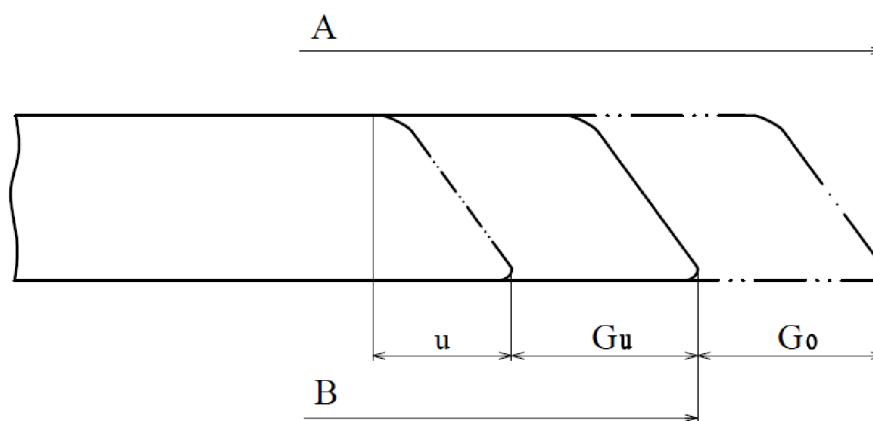


Obr. 11 Graf průměrné výšky profilu Rz5 pro materiál do 30 mm [55].

5.4 Rozměrové úchytky dílů

Tyto rozměrové úchytky dělíme do dvou kategorií, na rozměrové úchytky dílů bez dodatečného opracování a s dodatečným opracováním [55].

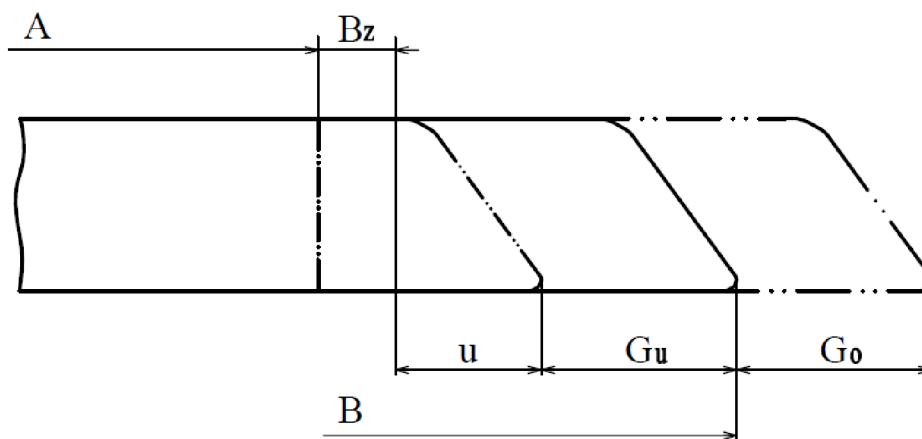
Díly bez dodatečného opracování musí být schopny po vyříznutí z plechu umístění do montážního celku. To znamená, že jmenovitý rozměr uříznutého dílu je určen ze jmenovitého rozměru dokončeného dílu snížen o hodnotu mezní úchytky jak je vidět na obr. 39. Hodnota příslušné mezní úchytky se stanovuje z norem [55].



Obr. 12 Rozměrové úchytky dílu bez dodatečného opracování [55].

- A [mm] - jmenovitý rozměr dokončeného dílu,
- B [mm] - jmenovitý rozměr uříznutého dílu,
- G_o [mm] - horní mezní úchytky,
- G_u [mm] - dolní mezní úchytky.

U dílu s dodatečným opracováním je nutné pro vnější rozměry řezaného dílce počítat s přídavkem na opracování, dále přičíst úchylku kolmosti nebo úhlovou úchylku a také dolní mezní úchylku. V případě vnitřních rozměrů řezaného dílce je nutné odpočítat přídavek na opracování a odečíst úchylku kolmosti nebo úhlovou úchylku a dále dolní mezní úchylku viz obr. 40 [55].



B_z [mm] - přídavek na opracování.

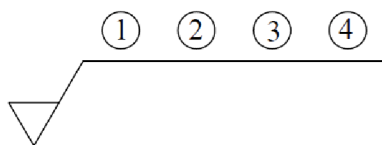
Obr. 40 Rozměrové úchytky dílu s dodatečným opracováním [55].

Přídavek na opracování se určí v závislosti na tloušťce plechu z níže uvedené tabulky č. 8, jestliže není na výkresu definována velikost tohoto přídavku [55].

Tab. 8 Přídavek na opracování [55].

Tloušťka řezu a	Přídavek na opracování pro jakýkoli povrch řezu B_z [mm]
$2 \leq a \leq 20$	2
$20 < a \leq 50$	3
$50 < a \leq 80$	5
$80 < a$	7

Značení povrchu jakosti řezu a toleranční třídy na výkresech podle mezinárodní normy ISO 9013 viz obr. 41.



Obr. 41 Značka požadované jakosti řezu a toleranční třídy [55].

Vysvětlení pozic:

- 1 - Označení čísla mezinárodní normy,
- 2 - Označení úchylky kolmosti nebo úhlové úchylky u ,
- 3 - Označení průměrné výšky prvků profilu $Rz5$,
- 4 - Označení toleranční třídy mezních úchylek jmenovitých rozměrů.

5.5 Taguchiho metoda

V rámci řešení experimentu diplomové práce je nutné zvolit vhodnou metodu pro analyzování získaných výsledků. Na výběr je částečná a plně faktorová metoda. To znamená že, na základě provedení několika pokusů, je následně zjišťována relevance jednotlivých faktorů nebo také význam na kvalitu výroby. Faktor může představovat například reznou rychlost nebo tlak plyn a jednotlivé úrovně jsou tedy různé nastavené hodnoty rezné rychlosti nebo tlaku plynu. Základní rozdíl mezi plně a částečně faktorovou metodou je v počtu uskutečněných pokusů měření a jejich vyhodnocení [56, 57, 58, 59].

Plně faktorová metoda závisí tedy na vyhodnocení všech existujících kombinací definovaných faktorů a jejich nastavení. Toto vyhodnocení umožňuje určit vliv jednotlivých faktorů na výsledek a nastavení konkrétních faktorů na výslednou kvalitu výrobku. Podle níže uvedeného vzorce se stanovuje počet nutných pokusů u této metody [56, 57, 58, 59].

$$n = k^j \quad [-] \quad (5.1)$$

kde: k [-] - počet zvolených faktorů

j [-] - počet úrovní faktorů

Z výše uvedeného vzorce je evidentní, že pokud pro experiment definujeme dva faktory o dvou úrovních bude výsledný počet pokusů čtyři. Jestliže bude počet faktorů stejný ale počet úrovní bude nastaveno na 3, tak výsledný počet pokusů bude nyní 8. To znamená, že s rostoucím počtem jednotlivých úrovní faktorů počty pokusů exponenciálně rostou. Níže je uvedena tabulka č. 9 plně faktorové metody pro 3 zvolené faktory a dvou úrovních faktorů [56, 57, 58, 59].

Tab. 9 Plně faktorová tabulka o 3 zvolených faktorech a 2 úrovních [57].

Číslo experimentu	faktor 1	faktor 2	faktor 3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	2	1
4	1	1	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

V případě částečné faktorové metody dochází k redukování výsledných počtů pokusů faktorů. Toho se dosáhne definováním pro experiment jen několika hlavních faktorů, ostatní faktory se vyjádří pomocí hlavních faktorů. Velice záleží na postupu tohoto vyjádření. Níže je uvedený výpočet pro částečný faktorový experiment [56, 57, 58, 59].

$$n = j^{k-p} \quad (5.2)$$

kde: p [-] - stupeň snížení

V případě dosažení 1 za stupeň snížení, bude výsledný počet pokusů poloviční. Stupeň snížení může být vyšší než jedna. Ale platí podmínka, že $n \geq k$, která znamená, že množství pokusů nemůže být nižší než počet zvolených faktorů [56, 57, 58, 59].

Mnohem výhodnější a komplexnější pohled na jakost u dosažených výsledků při snížení počtu experimentů poskytuje Taguchiho metoda. Prakticky jde o dosažení co nejvyšší kvality při výrobě současně s nejnižšími náklady. Tato metoda je známa již od druhé poloviny 20. Století, díky Dr. Genichu Taguchi, který byl výrazný inženýr a statistik. Mezi taguchiho myšlenky patří myšlenka, která uplatňuje „design pro kvalitu“. To znamená, že jestliže je výrobek navržena nekvalitně, tak pomocí kontroly nebo inspekce nemůže dojít k dosažení požadované kvality. Proto tedy je důležité soustředění na kvalitu již od počátku výroby součásti. Taguchiho metody se dělí na ztrátovou funkci, off-line kontrola a pojetí návrhu experimentu [56, 57, 58, 59].

Pojetí návrhu experimentu se dále dělí na:

Analýza situace – Nejdříve je nutné si stanovit posuzované faktory našeho experimentu a jejich úrovně. Výběh OA - Orthogonal Arrays to znamená v překladu ortogonální pole, jde vlastně o ortogonální tabulku pomocí které uskutečníme nejmenší možný počet jasně daných experimentů s maximálním množstvím získaných informací. Tím že se provede jen zlomek z celkového počtu pokusů experimentů dochází k časové i nákladové úspoře. Nejmenší ortogonální soustava je zobrazena v tabulce č. 10 [56, 57, 58, 59].

Tab. 10 Taguchiho ortogonální tabulka L4 pro 3 faktory ve dvou úrovních [57].

Číslo experimentu	faktor 1	faktor 2	faktor 3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Ze srovnání s tabulkou plně faktorové metody na předchozí straně, je zřejmé, že využitím Taguchiho metody, dojde k snadnějšímu dosažení výsledků. To že je tabulka ortogonální znamená, že ve všech sloupcích se stejný počet jedniček a dvojek. První řádek tabulky vždy obsahuje samé jedničky, ale nikdy neobsahuje samé dvojky. L v názvu tabulky znamená původ soustavy z Eulerových latinských čtverců [56, 57, 58, 59].

Provedení experimentů – následuje po určení ortogonální tabulky, která definuje, které faktory budeme vyšetřovat v kolika úrovních a také kolik experimentů budeme realizovat. Analýza výsledků – data získané z experimentu se následně mohou vyhodnotit pomocí analytické metody ANOVA. Tato metoda zkoumá rozdíly, jednotlivé interakce a vlivy jednotlivých faktorů. Získané výsledky mohou posloužit k nápravě nějakého problému, který byl na začátku experimentu definován [56, 57, 58, 59].

6 FIRMA HORÁCKÉ KOVODRUŽSTVO TŘEBÍČ

Horácké kovodružstvo Třebíč je společnost, která se zabývá kovovýrobou. Založení původní firmy se datuje na rok 1951 a určitým postupným vývojem se firma rozrůstala až do dnešní podoby, ve které působí na trhu od roku 1992. Obchodně ekonomická a technická činnost je soustředěna ve správě družstva v Třebíči a zmodernizované výrobní provozy jsou v obcích Mohelno a Rokytnice nad Rokytinou. Letecký pohled na provozovnu v Rokytnici nad Rokytinou je vidět níže na obr. 42 [60].

Hlavním výrobním programem ve výrobním závodě v Rokytnici nad Rokytinou je zakázková výroba různých oceloplechových krytů na krytování obráběcích strojů. Výrobky jsou také povrchově upraveny fosfátovou vrstvou a poté opatřeny nástřikem práškovým plastem. A také sériová výroba drobného zahradního nářadí, síta pro domácnosti a průmysl nebo také domácí mlýnky na obilí. Výroba zde probíhá pomocí laserového řezacího automatu Amada LC-F1 NT Series a také na laseru Amada LC 1212 ALPHA II, také pomocí tabulových nůžek, ohýbaček, výstředníkových lisů od 100 kN do 630 kN [60].



Obr. 42 Areál Horáckého kovodružstva Třebíč v Rokytnici nad Rokytinou [60].

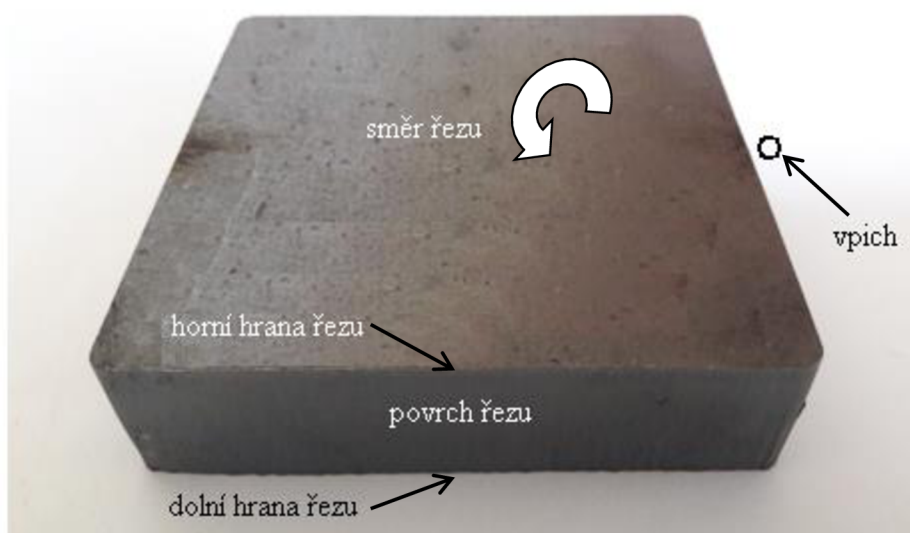
Ve výrobním závodě v Mohelně dochází také k zakázkové výrobě oceloplechových krytů a mezi sériovými výrobky patří pojezdová kola a kladky nebo také ocelové očníce. Výrobky jsou zde povrchově upravovány v lakovně nanášením tekutých nátěrových hmot. Výroba zde probíhá na tvářecích i obráběcích strojích jako jsou tabulové nůžky, ohýbačky, stáčečky, výstředníkové lisy od 100 do 2500 kN, frézky, soustruhy, vrtačky a brusky. Mezi další technologické vybavení patří svařování uhlíkové oceli, které je prováděno v ochranné atmosféře CO₂, obalovanou elektrodou, bodově a plamenem a toto svařování je možné provádět v obou výrobních závodech [60].

7 EXPERIMENT

Hlavním cílem diplomové práce je na základě optimalizace procesních parametrů nalézt optimální řezné podmínky z vyřezaných sad vzorků vzhledem k požadované kvalitě drsnosti povrchu a rychlosti řezání. Pro tento experiment byl využit laserový CO₂ laser Amada LC-F1-NT ve firmě Horácké kovodružstvo Třebíč. Následné vyhodnocení vzorků probíhalo v laboratoři Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně pod dohledem pana doc. RNDr. Libora Mrni, Ph.D [23].

Příprava a postup experimentu

Pro tento experiment byly zvoleny dva materiály ocel S355 MC a SSAB LASER 355 MC Plus o stejné tloušťce 20 mm. Geometrie vzorků byla stanovena na rozměry 80 x 80 mm. Rádus zaoblění hran R3. Na obrázku č. 43 je ukázka vyřezaného vzorku z ocele SSAB LASER 355 MC Plus.



Obr. 43 Ukázka vzorku řezu oceli SSAB Laser 355 MC Plus.

Vpich byl umístěn do středu můstku širokého 10 mm mezi jednotlivými čtverci. Vpich byl pulzní a trval cca 24 s. U každého materiálu byly vyřezány sady vzorků pomocí 7,5" a 10" fokusační čočky. Před započítáním řezání každé sady vzorků dle Taguchiho tabulek, byl vyřezán nultý vzorek řeznými parametry stanovenými jako optimální v rámci firmy. Vzorky byly řezány na laserovém řezacím CO₂ stroji Amada LC-F1 NT Series viz obr. 44, který se nachází ve výrobním závodě v Rokytnici nad Rokytnou.



Obr. 44 Ilustrační obrázek stroje Amada LC – F1 NT Series [61].

V Tab. 11 jsou uvedeny technické údaje laseru Amada LC – F1 NT Series.

Tab. 11 Technické údaje laseru Amada LC – F1 NT Series [62].

Model	LC-4020 F1 NT
Pracovní pojezd X - Y - Z [mm]	3270 - 1550 - 100
Zatížení stolu	1570 kg
Polohovací rychlost X/Y/Z	120/120/120 m/min
Max. zrychlení	30 m/s ²
Hmotnost stroje	13 000kg
Technologie pohonu	lineární pohon
Laser	
Max. trvalý výkon laseru	4000 W
Spotřeba laserového plynu	10l/h
Frekvence	5 – 2000 Hz
Vlnová délka laseru	10,6 μm
Řízení	
CNC řízení	AMNC-F
Obrazovka	dotyková obrazovka 15"
Kapacita paměti	10 MB

7.1 Sada vzorků ocele TATA STEEL S355MC

Prvním řezaným materiálem v rámci experimentu byla ocel S355MC. V tabulce č. 12 jsou uvedeny hodnoty mechanických vlastností dle materiálového listu, který je uveden v příloze č. 1. Hodnota pevnosti v tahu je poměrně na vysoké úrovni vzhledem k hodnotám z norem. Hodnoty pevnosti na mezi kluzu a tažnosti leží nad požadovaným minimem.

Tab. 12 Mechanické vlastnosti materiálu S355MC dle materiálového listu [63].

Pevnost v tahu Rm [MPa]	Pevnost na mezi kluzu Rp 0,2 [MPa]	Tažnost A80 [%]
509	min. 367	31

V tabulce č. 13 jsou uvedeny hodnoty dle normy a hodnoty z materiálového listu, který je uveden v příloze č. 1

Tab. 13 Chemické vlastnosti materiálu S355MC dle materiálového listu [63].

Chemický prvek	Hodnoty z materiálového listu [%]
Uhlík C	0,061
Křemík Si	0,021
Hliník Al	0,051

Síra S	0,002
Meď Cu	0,015
Molybden Mo	0,005
Vanad V	0,103
Mangan Mn	1,507
Fosfor P	0,016
Dusík N	0,052
Niob Nb	0,036
Chrom Cr	0,021
Nikl Ni	0,016
Cín Sn	0,305
Uhlíkový ekvivalent C_{ev}	0,266

Pro nultý vzorek byly zvoleny firemní řezné parametry, které jsou popsány v tabulce č. 14. Tyto parametry má firma nastaveny jako optimální na řezání velkých kontur z plechu o tloušťce 20 mm.

Tab. 14 Hodnoty řezných parametrů 0. Vzorku oceli TATA STEEL S355MC.

Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Výkon laseru [W]	Tlak O ₂ [bar]	Ohniskový fokus [mm]	Ø řezné trysky [mm]	Odstup trysky od plechu [mm]
0,55	3700	0,7	+ 1,5	2	1,5

V rámci experimentu byly regulovány tyto parametry: 1 – řezná rychlost, 2 – výkon laseru, a za 3 – tlak řezného plynu O₂. Další parametr, který byl měněn změnou čočky v řezné hlavě, byla poloha ohniska vzhledem k obrobku. V případě řezání 7,5" čočkou byla tato hodnota nastavena na + 1,5 mm od horní hrany obrobku směrem dolů. V případě řezání 10" čočkou byla tato hodnota nastavena na + 2,5 mm od horní hrany obrobku směrem dolů. Konstantní parametr jako je vzdálenost trysky od plechu byla v rámci celého experimentu pevně daná na hodnotu 1,5 mm. Dále také Ø řezné trysky, který byl 2 mm.

V rámci optimalizace řezných parametrů vzhledem k výrobní náročnosti velkého počtu vzorků byla volena variace 4 úrovní výše uvedených 3 regulovaných parametrů. Rozvržení těchto parametrů je znázorněno v tabulce č. 15, jenž se jedná o pravenou Taguchiho tabulku L16. S takto nadefinovanou tabulkou byly zpracovávány všechny hodnoty vyřezaných sad vzorků u obou materiálů. Jako první parametr byla určena řezná rychlost, neboť má největší vliv na proces řezání. Druhým parametrem byl zvolen výkon laseru a jako třetím tlak řezného plynu O₂.

Tab. 15 Rozvržení úrovní řezných parametrů - Taguchiho tabulka L16 [57].

Číslo pokusu	Řezná rychlost	Výkon	Tlak plynu O ₂
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4
14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1

Z hodnot nultého vzorku se vycházelo pro určení zbylých hodnot řezných parametrů. V tabulce č. 16 jsou znázorněny 4 úrovně stanovených řezných parametrů. S ohledem na efektivnost provozu výroby byly nastaveny dvě úrovně těchto parametrů na vyšší hodnoty a jedna úroveň na hodnotu nižší. Řezná rychlost byla rozdělena po 5 setinách v pásmu 0,5 – 0,65 m.min⁻¹. Výkon laseru byl také pravidelně rozdělen v pásmu 3550 – 4000 W. Došlo tedy k využití maximálního výkonu laseru v rámci experimentu.

Tab. 16 Zvolené hodnoty řezných parametrů.

Úroveň parametru	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Výkon laseru [W]	Tlak O ₂ [bar]
1	0,5	3550	0,6
2	0,55	3700	0,7
3	0,6	3850	0,8
4	0,65	4000	0,9

Parametr tlaku řezného plynu musel být volen po desetínách (hodnoty setin nebylo možné navolit na stroji) a byl rozdělen v pásmu 0,6 – 0,9 barů. Pásma výkonu a tlaku řezného plynu byla zvolena poměrně v širším rozsahu oproti řezné rychlosti.

Tyto parametry byly následně dle Taguchiho metody zkombinovány v tabulce č. 17.

Tab. 17 Hodnoty řezných parametrů pro testy oceli S355MC [57].

Číslo vzorku	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Výkon [W]	Tlak plynu O ₂ [bar]
1	0,5	3550	0,6
2	0,5	3700	0,7
3	0,5	3850	0,8
4	0,5	4000	0,9
5	0,55	3550	0,7
6	0,55	3700	0,6
7	0,55	3850	0,9
8	0,55	4000	0,8
9	0,6	3550	0,8
10	0,6	3700	0,9
11	0,6	3850	0,6
12	0,6	4000	0,7
13	0,65	3550	0,9
14	0,65	3700	0,8
15	0,65	3850	0,7
16	0,65	4000	0,6

Sada vzorků ocele TATA STEEL S355MC řezané 7,5" čočkou

V rámci této sady došlo k vyřezání a vyjmutí z plechu všech vzorků. Hodnota polohy ohniska byla nastavena na + 1,5 mm od horní hrany řezu. Průběh vyřezávání provázely různé potíže. Jednalo se ve většině případů o široký řez téměř všech čtyř stran vzorků. K této vadě docházelo v důsledku podkritické řezné rychlosti anebo naopak při neúměrně vysoké hodnotě výkonu nebo tlaku řezného plynu. To mělo za následek zapálení boků řezu, což způsobilo velmi hluboké rýhy v řezu a také vznik velkých slzovitých otřepů na dolní hraně řezu. Vzorky č. 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 13 a 14 byly z výše uvedených důvodů vynechány z následného vyhodnocování výšky profilů Ra a Rz. Ostatní vzorky byly zahrnuty do vyhodnocování, nicméně také u nich se v menší míře vyskytovaly vady řezu, jako jsou otřepy na spodní hraně řezu, nebo na jedné straně vzorku široký řez. To bylo důsledkem postupného vypalování vzorků v řadě za sebou. Kdy došlo v okolí můstku po

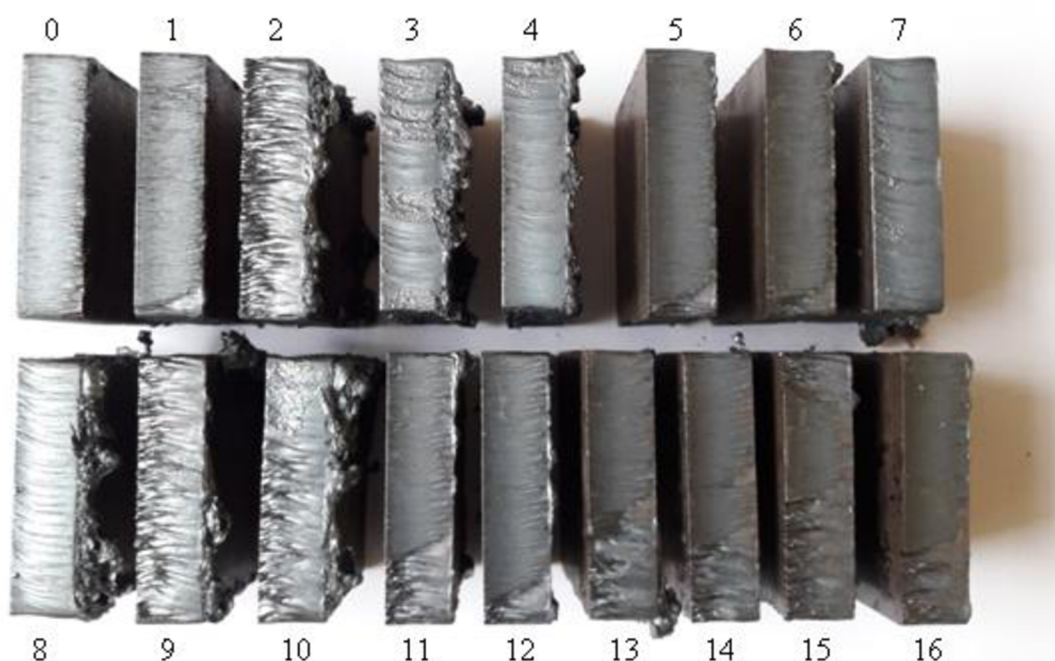
již vypáleném vzorku k tepelnému ovlivnění materiálu, což způsobovalo při vypalování dalšího vzorku u přilehlé strany zapálení boků.

Jako nejvíce povedený vzorek v rámci vizuálního vyhodnocení kvality řezu se umístil vzorek č. 0. Jako u jediného vzorku se nevyskytuje vada široký řez. Příčinou by mohlo být to, že byl vyřezán jako první v posloupnosti experimentu. V případě ale, že by se nebrala v potaz vada širokého řezu z jedné strany vzorku, nejpovedenějším by byl vzorek č. 16, který má nejmenší množství otřepů na spodní hraně ze všech vzorků. Vzorek č. 0 a č. 16 je znázorněn na obrázku č. 45.



Obr. 45 Vzorky č. 0 a č. 16 z pohledu na povrch řezu.

Veškeré vzorky vyřezané z materiálu S355MC pomocí 7,5" čocky jsou na obrázku č. 46.



Obr. 46 Sada vzorků materiálu S355MC řezané 7,5" čockou.

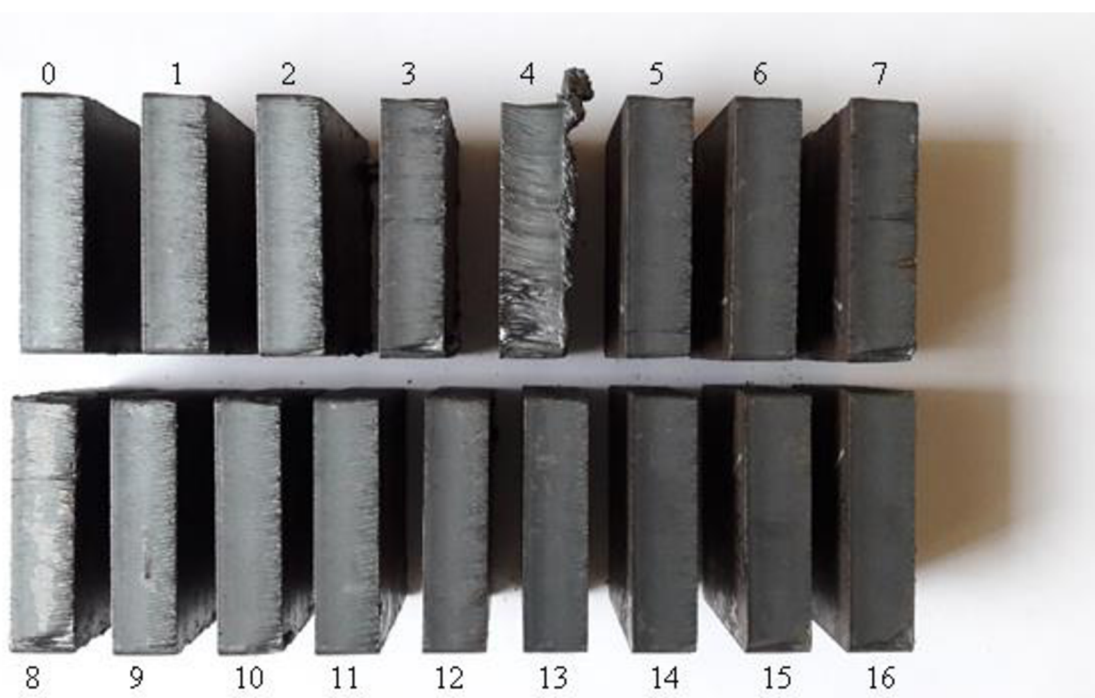
Sada vzorků ocele TATA STEEL S355MC řezané 10" čočkou

V rámci této sady vzorků došlo opět k vyřezání a vyjmutí všech vzorků. Jelikož u tohoto experimentu byla použita 10" čočka, byla hodnota polohy ohniska nastavená na + 2,5 mm od horní hrany řezu. Použití této čočky mělo pozitivní vliv na výslednou kvalitu řezu vzorků. Průběh vyřezávání byl mnohem hladší než v případě řezání se 7,5" čočkou. Nejhorší vadou byl široký řez, hluboké rýhy a otřepy na dolní hraně řezu, které se vytvořily u vzorků č. 2, 3, 4, 7 a 8. To bylo důsledkem kombinace vysoké hodnoty tlaku řezného plynu a podkritické řezné rychlosti. U vzorků č. 9 a 10 se v malé míře vyskytují také otřepy, ale již bez zapálených boků. Mezi vizuálně nejkvalitnější se umístily vzorky č. 14, 15, a 16, které jsou znázorněny na obr. 47. Vzorky č. 15 a 16 mají nepatrně upáleny dva rohy.



Obr. 47 Vzorky č. 14, č. 15 a č. 16 z pohledu na povrch řezu.

Veškeré vzorky vyřezané z materiálu S355MC pomocí 7,5" čočky jsou na obrázku č. 48.



Obr. 48 Sada vzorků ocele S355MC řezané 10" čočkou.

7.2 Sada vzorků ocele SSAB LASER 355 MC PLUS

Druhým řezaným materiálem v rámci experimentu byla ocel SSAB LASER 355 MC PLUS. Hodnota pevnosti v tahu leží zhruba uprostřed mezi hodnotami stanovenými výrobcem SSAB. Hodnoty pevnosti na mezi kluzu a tažnosti leží nad požadovaným minimem.

Tento typ materiálu je vyráběn s vyváženým a konzistentním chemickým složením, přesným procesem válcování za tepla. Tento postup výroby poskytuje materiálu výhody v dosažení vyšší řezné rychlosti při zachování kvality povrchu řezu. Výrobce u tohoto materiálu garantuje rovinnost menší než 3 mm po řezání laserem. Další vynikající vlastností materiálu je jeho zvýšená houževnatost, která je garantována i při teplotách okolo -60°C . V tabulce č. 18 je znázorněné srovnání mechanických a chemických hodnot těchto dvou typů materiálu [50].

Tab. 18 Mechanické a chemické vlastnosti obou typů materiálů [63, 64].

Mechanické vlastnosti	TATA STEEL S355MC	SSAB Laser 355 MC PLUS
Pevnost v tahu R_m [MPa]	509	461
Pevnost na mezi kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	367	393
Tažnost A_{80} [%]	31	30
Chemický prvek	TATA STEEL S355MC	SSAB Laser 355 MC PLUS
Uhlík C	0,061	0,086
Křemík Si	0,021	0,02
Hliník Al	0,051	0,042
Síra S	0,002	0,003
Meď Cu	0,015	0,032
Molybden Mo	0,005	0,03
Vanad V	0,103	0,018
Mangan Mn	1,507	1,37
Fosfor P	0,016	0,013
Niob Nb	0,036	0,025
Chrom Cr	0,021	0,04
Nikl Ni	0,016	0,03
Uhlíkový ekvivalent C_{ev}	0,266	0,33

Z výše uvedené tabulky je patrné, hodnoty mechanických vlastností obou materiálů jsou si podobné. Větší rozdíly lze najít v chemickém srovnání. Vliv obsahu chemických prvků v materiálu má důležitý podíl na výslednou kvalitu řezu. Čím silnější materiál, tím má tento vliv chemických prvků větší význam. Vyšší obsah uhlíku obecně znamená horší řezatelnost materiálu. Dochází tak k většímu zakalení v tepelné ovlivněné oblasti a to může způsobovat potíže například při řezání malých otvorů nebo ostrých rohů. Nižší obsah

uhlíku má ocel typu TATA STEEL. Nejvýznamnější negativní vliv na kvalitu řezu má křemík, který na sebe vztahuje kyslík a má nepříznivý vliv na povrchové napětí a viskozitu taveniny. Což způsobuje zhrubnutí řezu a vznik otřepů. Ocel typu SSAB má o setinu nižší procentní obsah křemíku. Vytváření segregací a vměstků způsobují další nežádoucí prvky síra a fosfor. V případě síry má větší obsah ocel typu SSAB, v případě fosforu zase ocel typu TATA STEEL. Pozitivní vliv na proces řezání a při zapichování má vliv mědi, chromu a niklu. Mohou také snížit negativní vliv křemíku. Obsah těchto tří prvků je větší v případě ocele typu SSAB [65].

Stejně jako v případě provádění zkoušek na předešlém materiálu, byly zvoleny hodnoty pro nultý vzorek podle optimálních firemních řezných parametrů viz tabulka č. 19.

Tab. 19 Hodnoty řezných parametrů 0. vzorku oceli SSAB Laser 355 MC PLUS.

Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Výkon laseru [W]	Tlak O ₂ [bar]	Ohniskový fokus [mm]	∅ řezné trysky [mm]	Odstup trysky od plechu [mm]
0,55	3700	0,7	+ 1,5	2	1,5

V tomto experimentu byly stejně jako u předešlého materiálu regulovány řezné parametry, které byly dle Taguchiho metody zkombinovány v tabulce č. 20.

Tab. 20 Hodnoty řezných parametrů pro testy oceli SSAB Laser 355 MC PLUS [57].

Číslo vzorku	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Výkon [W]	Tlak plynu O ₂ [bar]
1	0,5	3550	0,6
2	0,5	3700	0,7
3	0,5	3850	0,8
4	0,5	4000	0,9
5	0,55	3550	0,7
6	0,55	3700	0,6
7	0,55	3850	0,9
8	0,55	4000	0,8
9	0,6	3550	0,8
10	0,6	3700	0,9
11	0,6	3850	0,6
12	0,6	4000	0,7
13	0,65	3550	0,9
14	0,65	3700	0,8
15	0,65	3850	0,7
16	0,65	4000	0,6

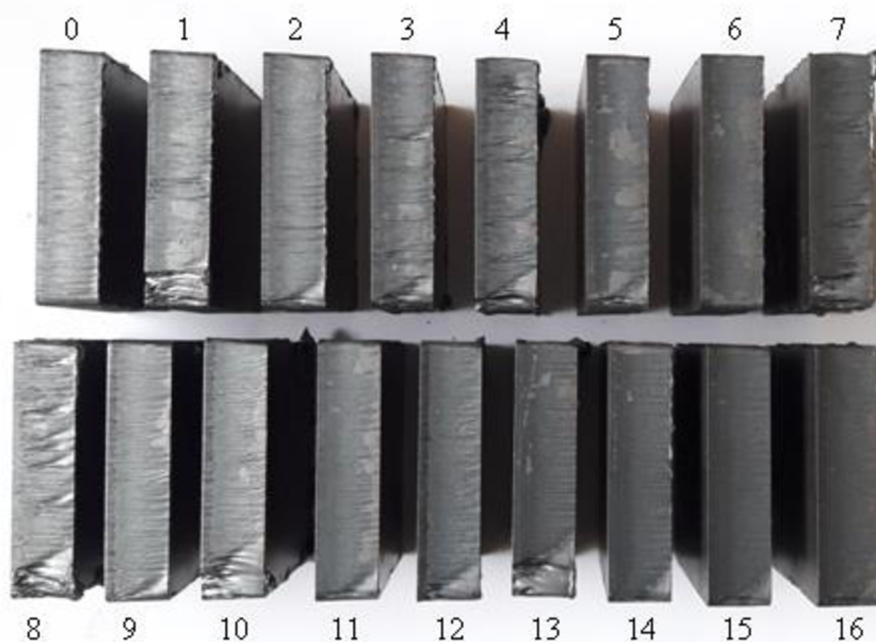
Sada vzorků ocele SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 7,5" čočkou

U této sady vzorků došlo k vyřezání a vyjmutí všech stanovených vzorků. Poloha ohniska byla nastavená na hodnotu + 1,5 mm od horní hrany řezu. Při tomto experimentu docházelo u většiny vzorků k širokému řezu. To bylo způsobeno vyřezáváním vzorků v řadě za sebou, kdy došlo vždy u dalšího vzorku u přilehlé strany k zapálení boků. Týkalo se to vzorků č. 3, 4, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15 a 16. A z malé části také vzorků 1, 2, 9 a 10. Otřepy na dolní hraně řezu se týkají všech vzorků kromě jediného vzorku č. 15. Vzorek č. 0 má z jedné strany hluboké rýhy. Mezi vizuálně nejkvalitnější se umístily vzorky č. 11, 15, a 16, které jsou znázorněny na obr. 49. Vzorky tři vzorky mají nepatrně upáleny dva rohy.



Obr. 49 Vzorky č. 11, č. 15 a č. 16 z pohledu na povrch řezu.

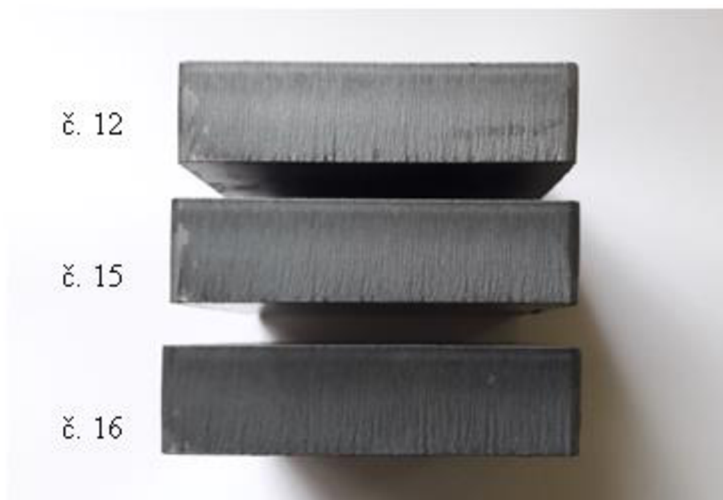
Veškeré vzorky vyřezané z materiálu SSAB Laser 355 MC PLUS pomocí 7,5" čočky jsou na obrázku č. 50.



Obr. 50 Sada vzorků ocele SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 7,5" čočkou.

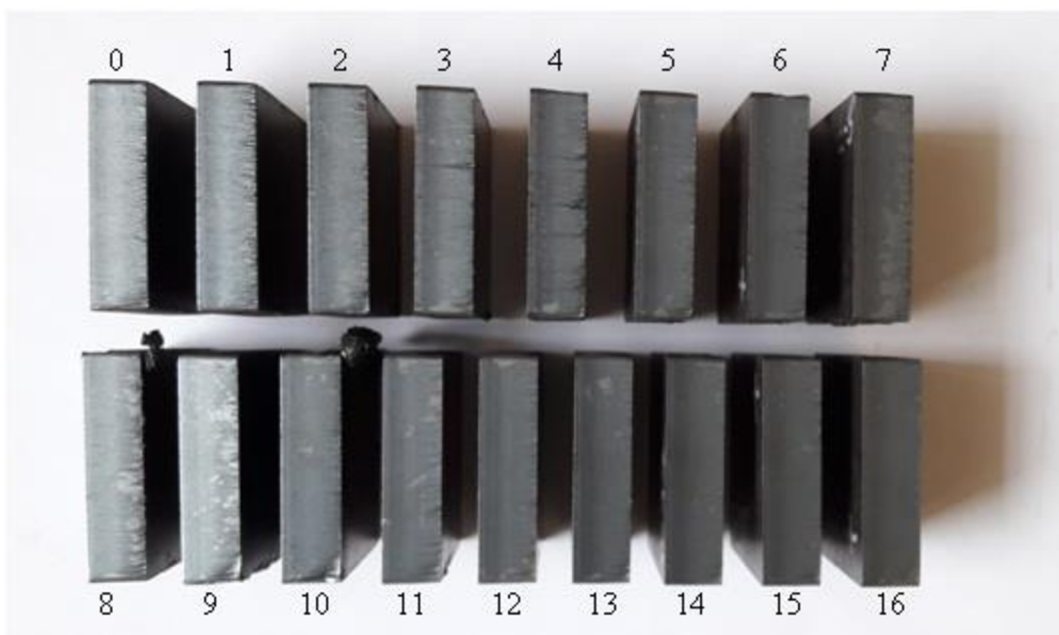
Sada vzorků ocele SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 10" čočkou

U této sady vzorků došlo také k vyřezání a vyjmutí všech stanovených vzorků z plechu. V tomto experimentu byla použita 10" čočka. Poloha ohniska byla tedy nastavená na hodnotu + 2,5 mm od horní hrany řezu. Průběh vyřezávání vzorku, byl mnohem hladší, než v případě použití 7,5" čočky. To znamená, že bylo docíleno celkově kvalitnějších řezů u všech vzorků. V případě vzorků č. 7, 8, 9, 10 a 11 došlo jen z malé části na jedné straně k zapálení boků. U těchto vzorků se také vyskytují otřepy na dolní hraně řezu. Mezi vizuálně nejvyšší se umístily vzorky č. 12, 15, a 16, které jsou znázorněny na obr. 51.



Obr. 51 Vzorky č. 11, č. 15 a č. 16 z pohledu na povrch řezu.

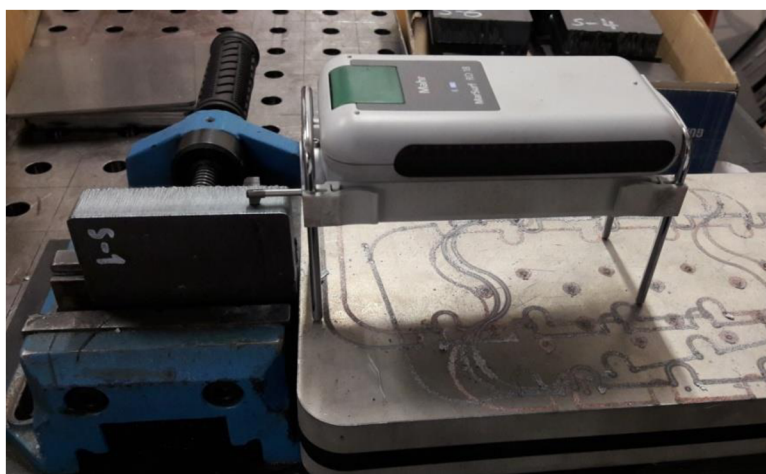
Veškeré vzorky vyřezané z materiálu SSAB Laser 355 MC PLUS pomocí 10" čočky jsou na obrázku č. 52.



Obr. 52 Sada vzorků ocele SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 10" čočkou.

7.3 Měření drsnosti vzorků

Pro vyhodnocení kvality sad vzorků, bylo zapotřebí změřeni jejich drsnosti řezu. To se uskutečnilo v laboratoři Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně pod dohledem pana doc. RNDr. Libora Mrni, Ph.D. Měření probíhalo na digitálním drsnoměru značky MarSurf M 300. Jedná se o vysoce mobilní a výkonnou jednotku pro souvislé měření ve směru řezání. Měřicí jednotka RD 18 viz obr. 53 může posílat naměřená data přes kabel nebo Bluetooth do řídicí jednotky MarSurf M 300 viz obr. 54, která následně data vyhodnocuje. Každý vzorek byl před samotným měřením upnut do svěraku, kvůli zajištění proti pohybu. Pořadí měření bylo určeno číslem jednotlivých vzorků. Výsledky měření byly zobrazeny na displeji drsnoměru MarSurf M 300. [23, 66].



Obr. 53 Měřicí jednotka RD 18 při měření vzorku.



Obr. 54 MarSurf M 300.

Nejdůležitější technické údaje drsnoměru MarSurf M300 jsou uvedeny v tabulce č. 21.

Tab. 21 Technické údaje drsnoměru MarSurf M 300 [66].

Rozsah měření [μm]	350
Posuvová rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	0,5
Měřená délka [mm]	1,75/5,6/17,5 nebo 1/2/4/8/12/16
Rozlišení profilu	90 μm , 180 μm , 350 μm , 8 nm, 16 nm, 32 nm
Vyhodnocované parametry	Ra, Rz, Rq, apod.
Hmotnost [kg]	1,1
Operační rozsah teplot [$^{\circ}\text{C}$]	od + 5 do + 40
Rozlišení LCD obrazovky [px]	320 x 240

Místo na vzorku, kde probíhalo měření, bylo určeno podle normy ČSN EN 9013, která stanovuje provádět měření v první třetině od horní hrany řezu. Délka pojezdu hrotu měřicí jednotky RD 18 byla 1,75 mm. V této délce byla vyhodnocena hodnota drsnosti Ra a Rz5. U každého vzorku probíhalo toto měření ze tří stran. Tyto hodnoty byly dále zpracovány do jednotlivých tabulek podle druhu řezaného materiálu a použité fokusační čočky.

7.3.1 Hodnoty drsnosti vzorků oceli S355MC řezané 7,5" čočkou

V níže uvedené tabulce č. 22 jsou uvedeny naměřené hodnoty parametru drsnosti Ra a Rz5 ze tří stran každého vzorku dle Taguchiho metody. Dále je v tabulce uvedena výsledná drsnost, což je průměr těchto tří hodnot parametrů. Předposlední sloupec tvoří výpočty směrodatné odchylky a v posledním jsou popsány vady na konkrétních vzorcích.

Tab. 22 Zaznamenané hodnoty drsnosti oceli S355MC řezané 7,5" čočkou.

Vzorek	Parametr drsnosti	Hrana č.1 [μm]	Hrana č.2 [μm]	Hrana č.3 [μm]	Výsledná drsnost [μm]	Směrodatná odchylka [μm]	Vady
0	Ra	3,91	3,81	2,80	3,51	0,50	otřepy, rýhy,
	Rz5	12,94	15,56	14,54	14,35	1,08	
1	Ra	3,40	6,44	4,82	4,89	1,24	otřepy, rýhy široký řez
	Rz5	13,85	27,82	21,19	20,95	5,71	
5	Ra	3,50	3,66	3,91	3,69	0,17	otřepy, rýhy široký řez
	Rz5	15,34	14,81	17,79	15,98	1,30	
6	Ra	4,25		3,10	3,68	0,58	otřepy, rýhy široký řez
	Rz5	18,86		16,41	17,64	1,23	
11	Ra	4,19	2,64	3,06	3,30	0,65	otřepy, rýhy široký řez
	Rz5	18,24	14,07	15,35	15,89	1,74	
12	Ra	3,26	3,26	3,41	3,31	0,07	otřepy, rýhy široký řez
	Rz5	13,93	15,34	15,63	14,97	0,74	
15	Ra	4,85		3,25	4,05	0,80	otřepy, rýhy široký řez
	Rz5	18,95		15,46	17,21	1,75	
16	Ra	3,18	3,11	3,21	3,17	0,01	otřepy, rýhy široký řez
	Rz5	17,55	15,53	15,99	16,77	0,78	

Vyřezávání této sady vzorků provázely komplikace jako zapálení boků řezu, hluboké rýhy v řezu nebo vznik velkých otřepů na dolní hraně řezu. Proto mohly být použity pro měření hodnot parametrů drsnosti pouze vzorky uvedené v tabulce č. 22. Avšak i u všech těchto vzorků se vyskytují určité vady, které jsou zaznamenané v tabulce. Na první pozici dle parametru Ra se umístil vzorek č. 16. Jako druhý se umístil vzorek č. 11, jehož hodnota velikosti Ra má větší rozptyl, tudíž i jeho směrodatná odchylka je vyšší. U vzorků č. 6 a 15 byly hodnoty drsnosti naměřeny jen ze dvou stran z důvodu zbylých dvou stran nekvalitní plochy řezu viz obrázek č. 55.



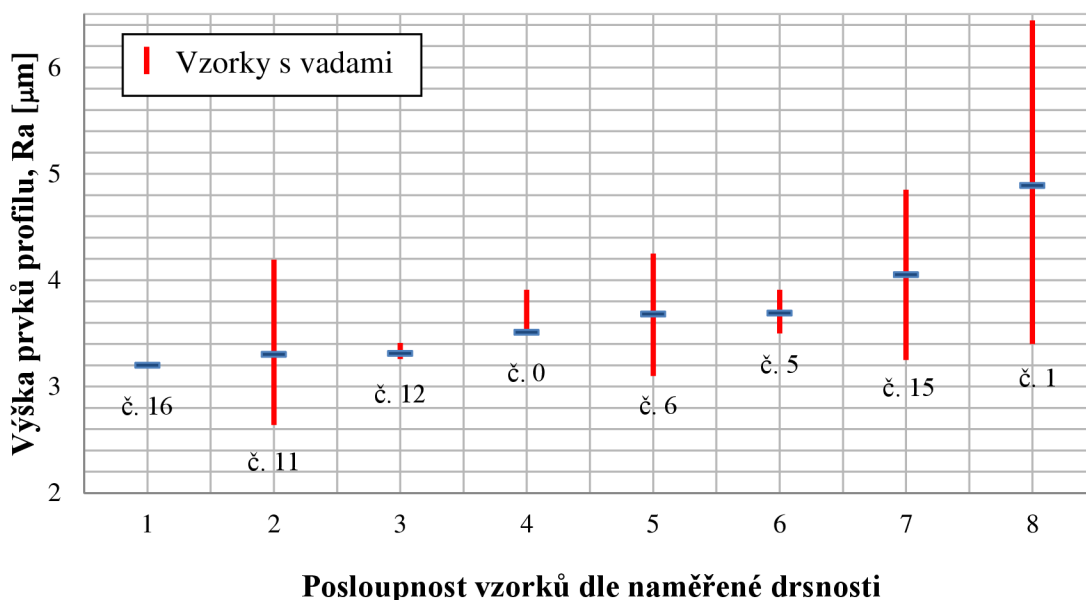
č. 6



č. 15

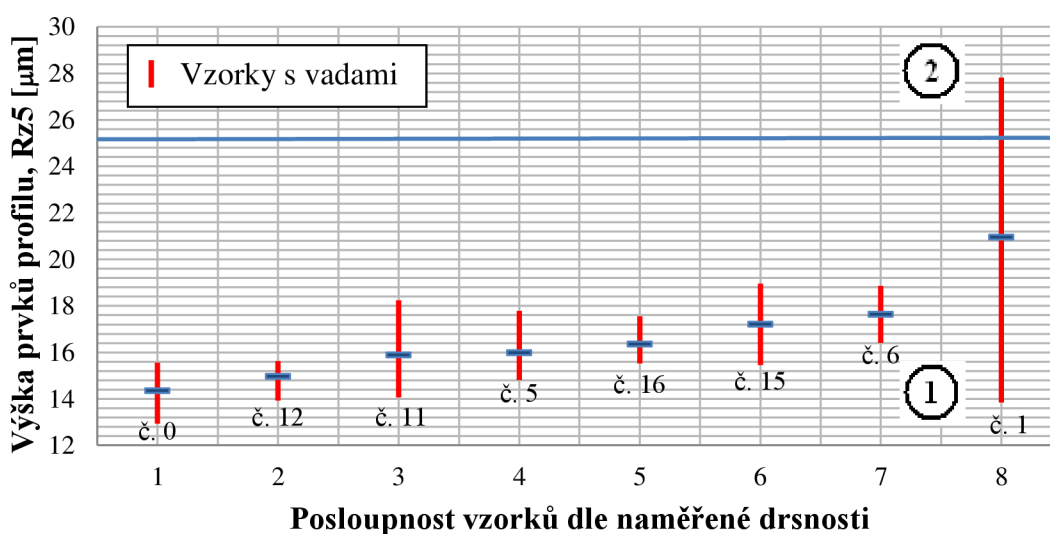
Obr. 55 Fotografie nekvalitní řezné hrany vzorku č. 6 a 15.

Seřazené vzorky dle parametru Ra zobrazuje graf na obrázku č. 56. Hodnota rozptylu drsnosti je u vzorku č. 16 téměř nulová. U ostatních naměřených vzorků rozptyl drsnosti vykazuje určitou hodnotu.



Obr. 56 Graf posouzení drsnosti Ra vzorků oceli S355MC řezané 7,5" čočkou.

Na obrázku č. 57 je graf, který znázorňuje seřazené vzorky podle naměřeného parametru Rz5 u vzorků. Všechny vyhodnocované vzorky se umístili do první třídy jakosti podle normy ČSN EN 9013. Pouze vzorek č. 1 má poměrně vysoký rozptyl naměřených hodnot oproti ostatním vzorkům, tudíž i směrodatnou odchylku, proto není absolutně umístěn v první třídě jakosti.



Obr. 57 Graf posouzení drsnosti Rz5 vzorků oceli S355MC řezané 7,5" čočkou [55].

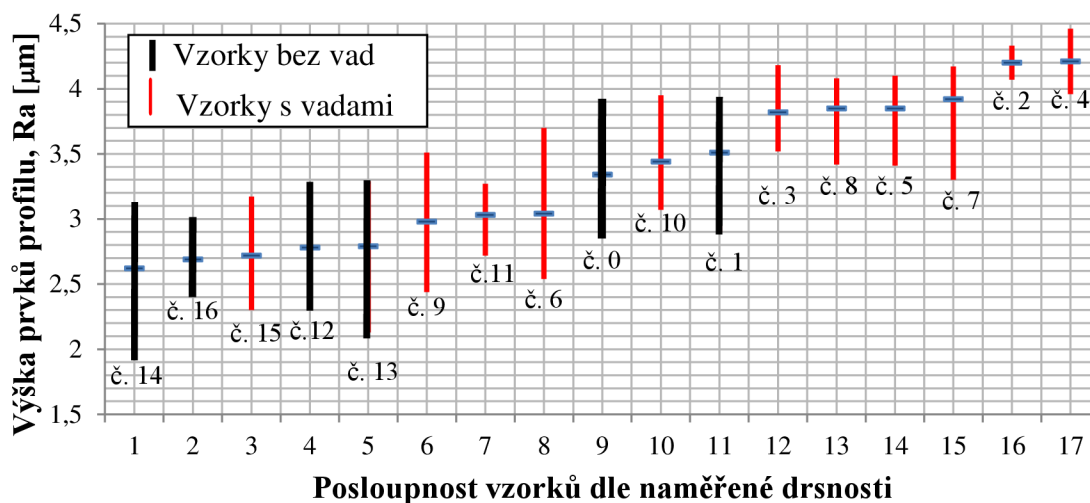
7.3.2 Hodnoty drsnosti vzorků oceli S355MC řezané 10" čočkou

V rámci této sady byly změřeny hodnoty parametrů drsnosti u všech vzorků dle Taguchiho metody. V tabulce č. 23 jsou uvedeny naměřené hodnoty parametru drsnosti Ra a Rz5 dle Taguchiho metody. Většina vzorků z této sady obsahuje určité vady.

Tab. 23 Zaznamenané hodnoty drsnosti oceli S355MC řezané 10" čočkou.

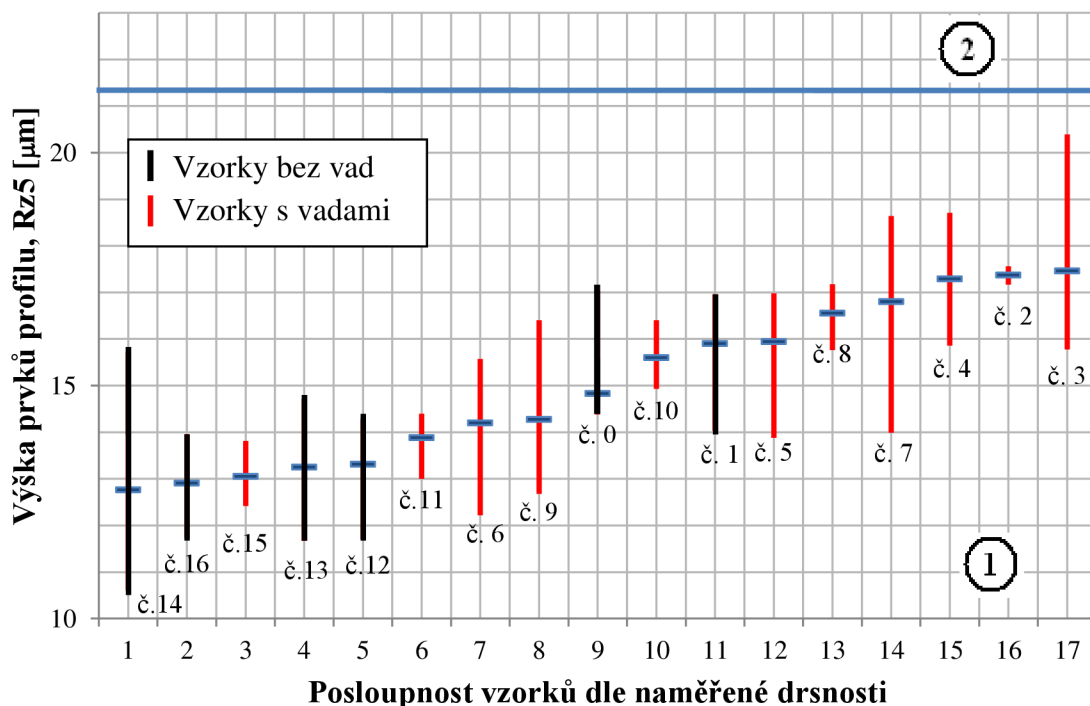
Vzorek	Parametr drsnosti	Strana č.1 [μm]	Strana č.2 [μm]	Strana č.3 [μm]	Průměrná drsnost [μm]	Směrodatná odchylka [μm]	Vady
0	Ra	3,23	3,91	2,87	3,34	0,43	
	Rz5	14,38	17,04	13,08	14,83	1,65	
1	Ra	3,71	2,90	3,91	3,51	0,44	
	Rz5	16,71	14,03	16,96	15,90	1,33	
2	Ra	4,33	4,07		4,20	0,13	široký řez otřepy, rýhy
	Rz5	17,17	17,56		17,37	0,19	
3	Ra	3,75	4,18	3,52	3,82	0,27	široký řez otřepy, rýhy
	Rz5	15,78	20,39	16,20	17,46	2,08	
4	Ra	4,46	3,96		4,21	0,25	široký řez otřepy, rýhy
	Rz5	18,71	15,86		17,29	1,42	
5	Ra	3,41	4,04	4,10	3,85	0,31	rýhy
	Rz5	13,88	16,98	16,95	15,94	1,45	
6	Ra	2,87	2,54	3,70	3,04	0,49	rýhy
	Rz5	14,81	12,22	15,57	14,20	1,43	
7	Ra	3,30	4,17	4,30	3,92	0,44	široký řez otřepy, rýhy
	Rz5	13,99	18,64	17,76	16,80	2,02	
8	Ra	3,42	4,04	4,06	3,84	0,30	široký řez otřepy, rýhy
	Rz5	15,76	17,18	16,72	16,55	0,59	
9	Ra	3,51	2,44	3,00	2,98	0,44	otřepy, rýhy
	Rz5	16,40	12,68	13,72	14,27	1,57	
10	Ra	3,07	3,95	3,30	3,44	0,37	otřepy, rýhy
	Rz5	14,93	16,40	15,47	15,60	0,61	
11	Ra	3,27	2,72	3,10	3,03	0,23	rýhy
	Rz5	14,40	13,00	14,24	13,88	0,63	
12	Ra	2,34	3,28	2,71	2,78	0,39	
	Rz5	11,71	14,29	13,92	13,31	1,14	
13	Ra	2,13	2,95	3,29	2,79	0,49	
	Rz5	11,67	13,37	14,71	13,25	1,24	
14	Ra	1,94	3,12	2,79	2,62	0,50	
	Rz5	10,61	15,71	11,96	12,76	2,16	
15	Ra	2,70	2,30	3,19	2,73	0,36	rýhy
	Rz5	12,93	12,42	13,81	13,05	0,57	
16	Ra	3,01	2,42	2,63	2,69	0,24	
	Rz5	13,96	11,73	13,05	12,91	0,92	

Pořadí vzorků dle parametru Ra zobrazuje graf na obrázku č. 58. Jako nejkvalitnější vzorek z hlediska kvality řezu se umístil vzorek č. 14. Jako druhý těsně v pořadí se umístil vzorek č. 16, který má o něco menší směrodatnou odchylku oproti vzorku č. 14. Mezi další v pořadí neobsahující výrazné vady se umístily vzorky č. 12, 13, 0 a 1. Vzorek č. 15 se umístil na třetím místě, nicméně obsahuje rýhy v dolní části řezu.



Obr. 58 Graf posouzení drsnosti Ra vzorků oceli S355MC řezané 10'' čoučkou.

Graf na obrázku č. 59 znázorňuje seřazené vzorky podle naměřeného parametru Rz5 u vzorků. Opět došlo k umístění všech vzorků do první třídy jakosti podle normy ČSN EN 9013.



Obr. 59 Graf posouzení drsnosti Rz5 vzorků oceli S355MC řezané 10'' čoučkou [55].

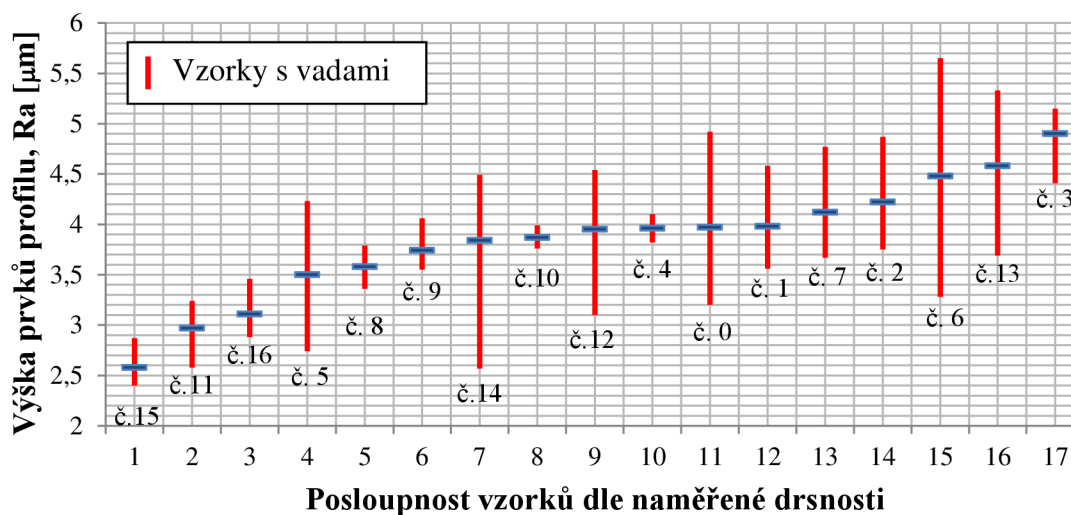
7.3.3 Hodnoty drsnosti vzorků oceli SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 7,5" čoučkou

Hodnoty parametru drsnosti Ra a Rz5 naměřené dle Taguchiho metody jsou uvedeny v tabulce č. 24. Všechny vzorky této sady vykazují nejčastější vadu široký řez, dále rýhy nebo ořepy na dolní hraně řezu.

Tab. 24 Hodnoty drsnosti oceli SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 7,5" čoučkou.

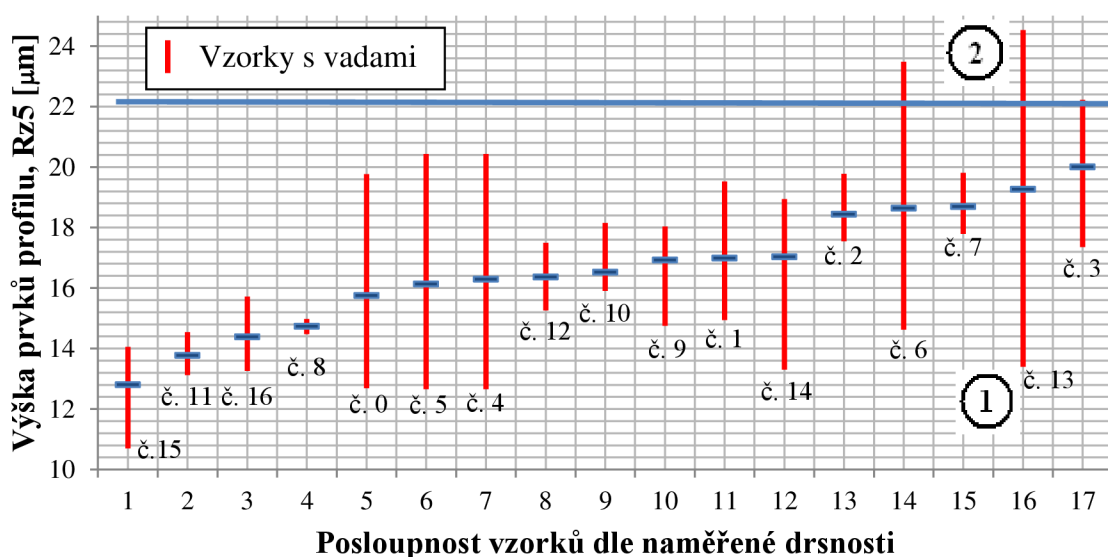
Vzorek	Parametr drsnosti	Strana č.1 [μm]	Strana č.2 [μm]	Strana č.3 [μm]	Střední hodnota	Směrodatná odchylka [μm]	Vady
0	Ra	3,78	3,2	4,92	3,97	0,71	Rýhy ořepy
	Rz5	14,79	12,69	19,77	15,75	2,97	
1	Ra	3,56	4,58	3,81	3,98	0,43	široký řez ořepy
	Rz5	14,94	19,52	16,50	16,99	1,90	
2	Ra	4,03	4,87	3,75	4,22	0,48	široký řez ořepy
	Rz5	17,55	19,78	17,96	18,43	0,97	
3	Ra	5,15	5,13	4,41	4,90	0,34	široký řez ořepy
	Rz5	22,22	20,42	17,36	20,00	2,01	
4	Ra	3,82		4,10	3,96	0,14	široký řez ořepy
	Rz5	15,79		12,66	16,29	3,19	
5	Ra	3,52	4,23	2,74	3,50	0,61	rýhy ořepy
	Rz5	15,29	20,43	12,66	16,13	3,23	
6	Ra	4,51	5,65	3,28	4,48	0,97	rýhy ořepy
	Rz5	17,79	23,48	14,63	18,63	3,66	
7	Ra	3,92	4,77	3,67	4,12	0,47	široký řez ořepy
	Rz5	18,47	19,81	17,79	18,69	0,84	
8	Ra	3,36		3,79	3,58	0,21	široký řez ořepy
	Rz5	14,97		14,48	14,73	0,24	
9	Ra	4,06	3,55	3,62	3,74	0,23	široký řez ořepy
	Rz5	18,03	17,98	14,75	16,92	1,53	
10	Ra	3,86	3,76	3,99	3,87	0,09	široký řez ořepy
	Rz5	15,91	15,50	18,15	16,52	1,16	
11	Ra	3,10	2,58	3,24	2,97	0,28	široký řez ořepy
	Rz5	13,66	13,12	14,54	13,77	0,59	
12	Ra	4,20	4,54	3,10	3,95	0,61	široký řez ořepy
	Rz5	16,32	17,49	15,26	16,36	0,91	
13	Ra	4,72	5,33	3,69	4,58	0,68	široký řez ořepy
	Rz5	19,86	24,53	13,40	19,26	4,56	
14	Ra	2,57	4,47	4,49	3,84	0,90	široký řez ořepy
	Rz5	13,30	18,94	18,86	17,03	2,64	
15	Ra	2,46	2,87	2,40	2,58	0,21	široký řez
	Rz5	13,61	14,05	10,70	12,79	1,49	
16	Ra	3,46	2,88	2,98	3,11	0,25	široký řez ořepy
	Rz5	15,71	13,26	14,18	14,38	1,01	

Na obrázku č. 60 je vyobrazen graf pořadí vzorků dle parametru Ra. Dle nejmenší hodnoty drsnosti se umístil vzorek č. 15. Od všech ostatních vzorků v sadě se odlišuje absencí ořepů na dolní hraně řezu. Jako druhý v pořadí se umístil vzorek č. 11. Třetí vzorek 16. U vzorků č. 4 a 8 hodnoty drsnosti naměřeny jen ze dvou stran z důvodu nekvalitní plochy řezu.



Obr. 60 Graf drsnosti Ra vzorků oceli SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 7,5" čočkou.

Pořadí vzorků podle parametru Rz5 znázorňuje obrázek č. 61. Všechny vzorky i přes obsahující vady se umístili do první třídy jakosti podle normy ČSN EN 9013. Vzorky č. 6 a 13 mají větší rozptyl hodnoty Rz5, nespádají tedy absolutně do první třídy jakosti.



Obr. 61 Graf drsnosti Rz5 vzorků oceli SSAB Laser 355 MC PLUS řez. 7,5" čočkou [55].

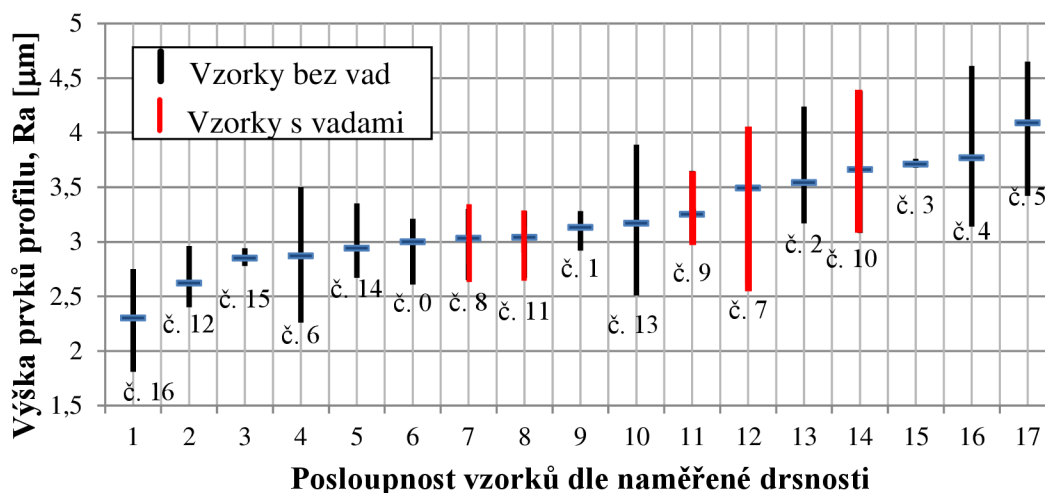
7.3.4 Hodnoty drsnosti vzorků oceli SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 10" čočkou

Tabulka č 25 zobrazuje naměřené hodnoty parametru drsnosti Ra a Rz5 dle Taguchiho metody této sady vzorků. Z hlediska dosažené kvality, vychází tato sada vzorků nejlépe ze všech měření. Vady v podobě širokého řezu se vyskytují pouze u vzorků č. 7, 8, 9,10 a 11.

Tab. 25 Hodnoty drsnosti oceli SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 10" čočkou.

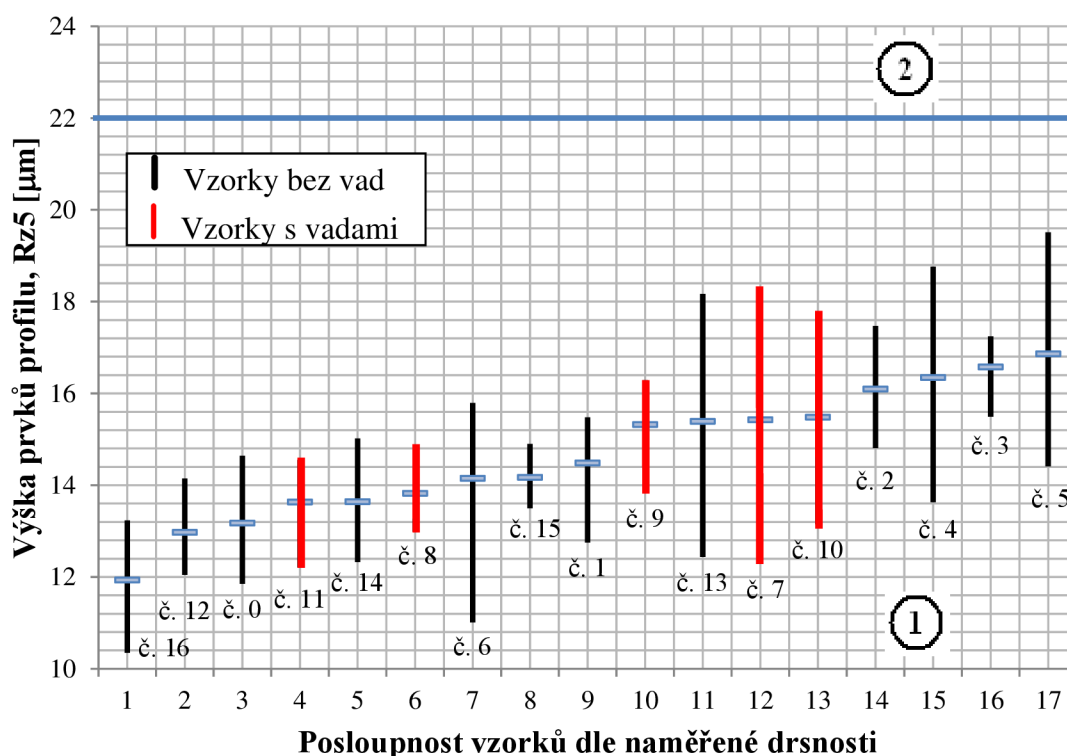
Vzorek	Parametr drsnosti	Strana č.1 [μm]	Strana č.2 [μm]	Strana č.3 [μm]	Střední hodnota	Směrodatná odchylka [μm]	Vady
0	Ra	3,21	3,18	2,61	3,00	0,28	
	Rz5	14,64	13,01	11,85	13,17	1,14	
1	Ra	3,18	3,28	2,92	3,13	0,15	
	Rz5	15,48	15,21	12,75	14,48	1,23	
2	Ra	3,17	4,24	3,22	3,54	0,49	
	Rz5	14,81	17,47	15,99	16,09	1,09	
3	Ra	3,70	3,68	3,76	3,71	0,03	
	Rz5	15,49	16,97	17,24	16,57	0,77	
4	Ra	4,61	3,57	3,14	3,77	0,62	
	Rz5	18,76	16,64	13,63	16,34	2,10	
5	Ra	4,65	3,42	4,19	4,09	0,51	
	Rz5	19,51	14,41	16,65	16,86	2,09	
6	Ra	2,26	3,50	2,85	2,87	0,51	
	Rz5	11,01	15,79	15,66	14,15	2,22	
7	Ra	4,02	3,84	2,61	3,49	0,63	Široký řez
	Rz5	18,22	15,69	12,36	15,42	2,40	
8	Ra	3,30	2,65	3,15	3,03	0,28	Široký řez
	Rz5	14,86	12,99	13,62	13,82	0,78	
9	Ra	3,01	3,08	3,65	3,25	0,29	Široký řez
	Rz5	16,29	13,93	15,75	15,32	1,01	
10	Ra	3,52	3,08	4,38	3,66	0,54	Široký řez
	Rz5	15,54	13,15	17,74	15,48	1,87	
11	Ra	3,18	2,67	3,28	3,04	0,27	Široký řez
	Rz5	14,14	12,21	14,55	13,63	1,02	
12	Ra	2,96	2,50	2,40	2,62	0,24	
	Rz5	14,15	12,71	12,05	12,97	0,88	
13	Ra	3,89	2,51	3,12	3,17	0,56	
	Rz5	18,17	12,44	15,55	15,39	2,34	
14	Ra	3,35	2,80	2,67	2,94	0,29	
	Rz5	15,02	12,33	13,57	13,64	1,10	
15	Ra	2,83	2,78	2,94	2,85	0,07	
	Rz5	14,90	14,11	13,50	14,17	0,57	
16	Ra	2,75	2,33	1,81	2,30	0,38	
	Rz5	13,23	12,21	10,35	11,93	1,19	

Graf na obrázku č. 62 vyobrazuje sled vzorků dle parametru Ra. Z hlediska kvality řezu se na prvním místě umístil vzorek č. 16. Jako druhý se umístil vzorek č. 12, který má o něco menší směrodatnou odchylku oproti vzorku č. 16. U této sady je nejmenší počet výskytu vadných vzorků. Jedná se tedy o sadu nejkvalitnějších vzorků v rámci celého experimentu.



Obr. 62 Graf drsnosti Ra vzorků oceli SSAB Laser 355 MC PLUS řezané 10'' čoučkou.

Graf na obrázku č. 63 znázorňuje seřazené vzorky podle naměřeného parametru Rz5. Do první třídy jakosti podle normy ČSN EN 9013 se umístili všechny měřené vzorky s poměrně velkou rezervou.



Obr. 63 Graf drsnosti Rz5 vzorků oceli SSAB Laser 355 MC PLUS řez. 10'' čoučkou [55].

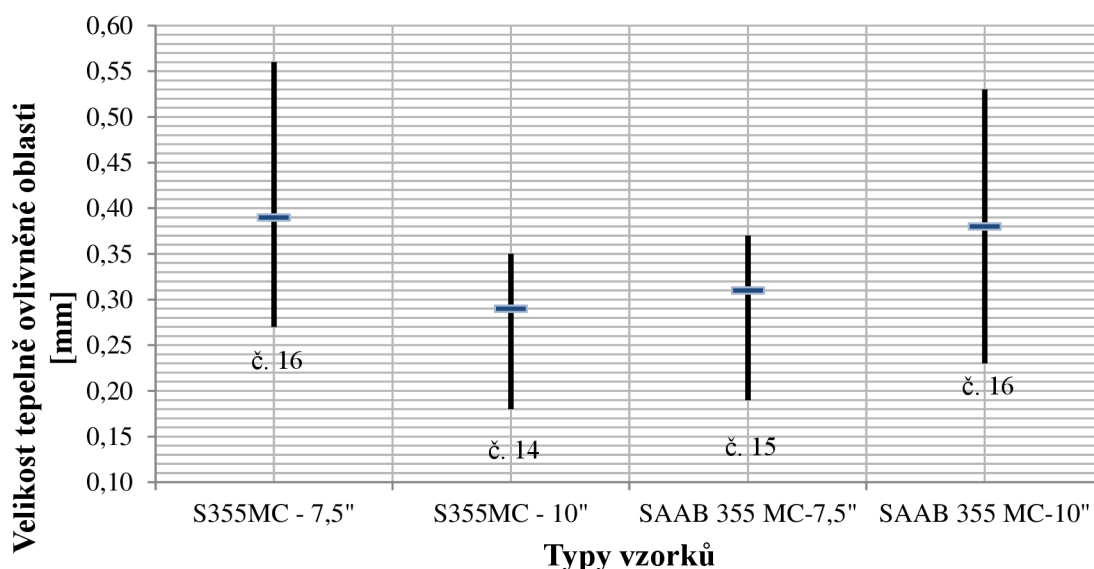
7.4 Vyhodnocení tepelně ovlivněné oblasti

Z výše popsaného průběhu vyřezávání všech vzorků byly zjištěny odlišné výsledky. Proto byli vybráni čtyři zástupci z hlediska dosažené nejlepší kvality řezu z jednotlivých sad vzorků. Za ocel TATA STEEL S355MC, byl vybrán vzorek č. 16, který byl vyřezán pomocí 7,5" čočky a vzorek č. 14, který byl vyřezán pomocí 10" čočky. Za ocel SSAB Laser 355 MC, byl vybrán vzorek č. 15, který byl vyřezán pomocí 7,5" čočky a vzorek č. 16, který byl vyřezán pomocí 10" čočky. Od každého vybraného vzorku byl následně uříznut malý kousek, který byl následně zalit a následně broušen papíry různé zrnitosti. Od nejhrubšího po nejjemnější. Poté byl vyleštěn diamantovou suspenzí s diamanty velikosti 9 μm a 3 μm na leštícím zařízení Struers Tegramin-20. Dále byl vzorek naleptán 3% roztokem kyseliny dusičné HNO_3 a pak opláchnutý lihem a vysušen horkovzdušnou pistolí. Z těchto vybroušených zalitých vzorků byly pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT3100 vytvořeny fotografie makro a poté mikro struktury. V tabulce č. 26 jsou uvedeny naměřené hodnoty tepelně ovlivněné části u vybraných vzorků [23].

Tab. 26 Naměřené hodnoty tepelně ovlivněných oblastí.

Vyhodnocení zástupci	Fokus. čočka ["]	Velikost tepelně ovlivněné oblasti [mm]			Průměrná hodnota
		horní hrana řezu	polovina šířky řezu	dolní hrana řezu	
č. 16 - S355MC	7,5	0,27	0,33	0,56	0,39
č. 14 - S355MC	10	0,18	0,33	0,35	0,29
č. 15 - SSAB 355 MC	7,5	0,19	0,36	0,37	0,31
č. 16 - SSAB 355 MC	10	0,23	0,37	0,53	0,38

Graf na obrázku č. 64 znázorňuje velikost tepelně ovlivněné oblasti u vybraných zástupců z každé sady vzorků.



Obr. 64 Graf tepelně ovlivněné oblasti u vybraných zástupců z každé sady vzorků.

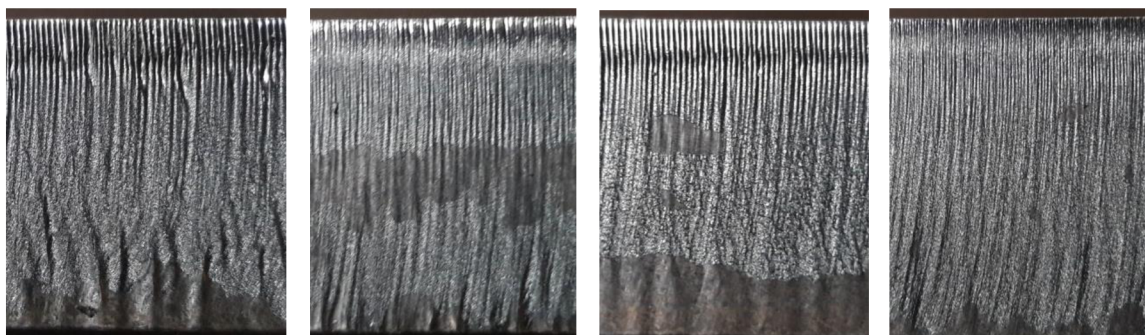
Z grafu na obr. č. 64 lze usoudit, že největší průměrná hodnota velikost tepelně ovlivněné oblasti se vyskytuje téměř shodně u obou typů materiálu u vzorků s číslem 16. Průměrná hodnota ovlivněné oblasti je větší jen o setinu u vzorku č. 16 řezaného 7,5" čočkou oproti druhému vzorku č. 16 řezaného 10" čočkou. V posouzení velikosti této oblasti mezi vzorky č. 14 a 15 je podobný rozdíl asi o 2 setiny větší průměrná hodnota tepelně ovlivněné oblasti je u vzorku č. 15 řezaného pomocí 7,5" čočky oproti druhému vzorku č. 15 řezaného 10" čočkou. Z toho lze usoudit, že změna velikosti (z 10" na 7,5") fokusační čočku zvětšuje průměrnou velikost tepelně ovlivněné oblasti asi o 0,015 mm od hrany řezu směrem do materiálu.

Z dalšího pohledu na graf lze usoudit, že vzorky č. 14 a 15 mají průměrnou hodnotu tepelně ovlivněné oblasti asi o 0,1 mm menší než oba vzorky č. 16. Vzorky č. 14 a č. 15 mají hodnotu výkonu nižší. Hodnoty tlaku řezného plynu mají ale vyšší. Velikost řezné rychlosti je u všech čtyřech vybraných zástupců stejná. Z toho lze usoudit, že s přibývajícím tlakem řezného plynu a snižujícím se výkonem se snižuje velikost tepelně ovlivněné oblasti. Hodnoty řezných parametrů a naměřených drsností jsou uvedeny v tabulce č. 27.

Tab. 27 Hodnoty parametrů vybraných vzorků.

Vyhodnocení zástupci		č. 16 – TATA S355MC	č. 14 – TATA S355MC	č. 15 – SSAB LASER 355 MC PLUS	č. 16 – SSAB LASER 355 MC PLUS
Řezné parametry	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	0,65	0,65	0,65	0,65
	Výkon [W]	4000	3700	3850	4000
	Tlak plynu O ₂ [bar]	0,6	0,8	0,7	0,6
	Fokusační čočka ["]	7,5	10	7,5	10
	Ohniskový fokus [mm]	1,5	2,5	1,5	2,5
Drsnost	Ra [μm]	3,17	2,62	2,58	2,3
	Ra sm. Odchylka [μm]	0,01	0,5	0,21	0,38
	Rz5 [μm]	16,77	12,76	12,79	11,93
	Rz5 sm. Odchylka [μm]	0,78	2,16	1,49	1,19

Na obrázku č. 65 je pohled na řezy hran vybraných zástupců skupin sad vzorků z hlediska dosažené nejlepší kvality řezu.



č. 16 – TATA S.
S355MC

č. 14 – TATA S.
S355MC

č. 15 – SSAB L.
355 MC PLUS

č. 16 – SSAB L.
355 MC PLUS

Obr. 65 Řezy vybraných zástupců z jednotlivých sad vzorků.

Z výše uvedeného obrázku lze usoudit, že vzorek č. 16 (SSAB Laser 355 MC Plus) má jednoznačně nejkvalitnější řeznou plochu z vybraných zástupců. Umístil se také na prvním místě hodnotou parametru Ra a Rz5.

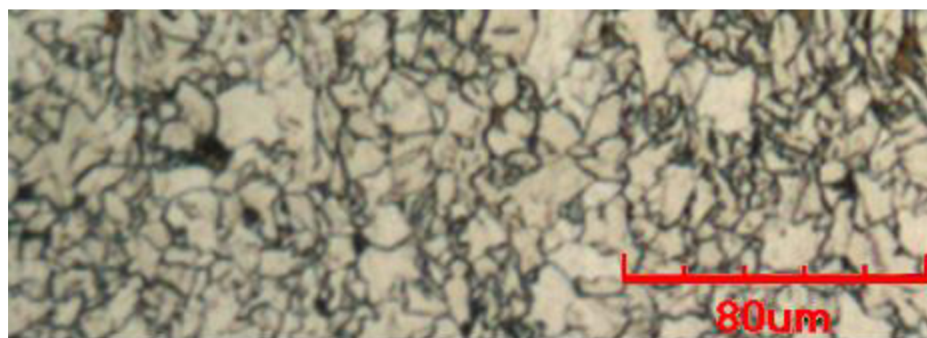
Jako druhý, se umístil vzorek č. 15 svým parametrem Ra. Použitím 7,5" fokusační čočky má za následek větší hodnotu drsnosti v horní části řezu a mírnou vlnitost v dolní části řezu. V parametru Rz5 obdržel třetí místo za vzorkem č. 14.

Na třetím místě se umístil vorek č. 14 (TATA Steel S355MC) svoji hodnotou drsnosti Ra. Hodnotou parametru Rz5 obdržel druhé místo v pořadí. Tento vzorek v detailnějším pozorování obsahuje nepatrné rýhy u dolní hrany řezu.

Na posledním místě z těchto vybraných zástupců se umístil vzorek č. 16 (TATA Steel S355MC). Dosahuje nejvyšších hodnot parametrů Ra a Rz5. To lze vidět i na detailním pohledu na jeho řeznou hranu na obrázku č. 64. Toto zhoršení kvality řezu má za následek použití 7,5" fokusační čočky.

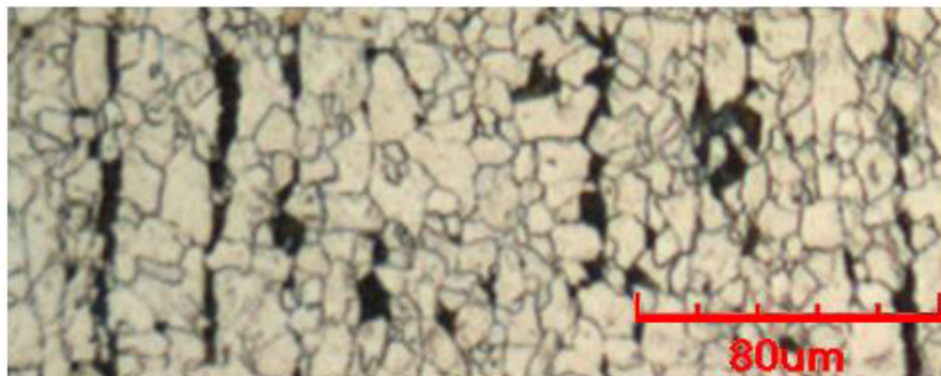
7.5 Zhodnocení mikro struktury vzorků v základní oblasti obou materiálů.

Z výše uvedeného vyhodnocení vybraných vzorků, je zřejmá diference v kvalitě řezu mezi materiálem TATA STEEL S355MC a SSAB LASER 355 MC PLUS. Tato diference je způsobená odlišným chemickým složením prvků a mechanických vlastností viz Tab. 20 [65, 66]. Z vytvořených metalografických výbrusů je vidět na obr. 66 a obr. 67 základní struktura obou typů materiálů (zvětšeno 20 x).



Obr. 66 Struktura základní oblasti oceli TATA STEEL S 355MC [23].

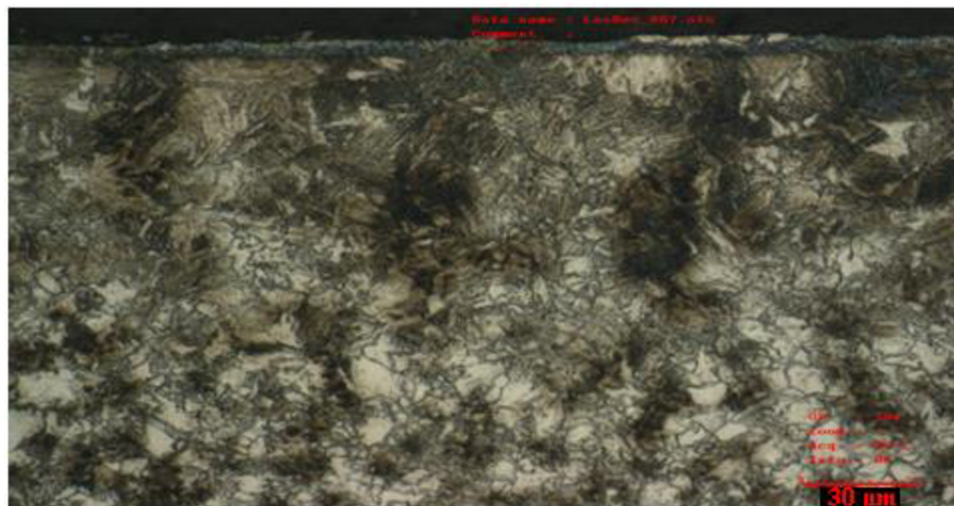
Struktura obou ocelí je více feriticko – perlitická. Avšak v případě ocele SSAB je vidět, že perlit je místy uspořádán do řádků důsledkem přesného procesu válcování za tepla. Současně s optimalizovanou regulací teploty pro vytvoření rovnoměrného a hladkého mikrovlnného povrchu. Ve struktuře materiálu SSAB lze také spatřit nestejnou velikost zrn perlitu.



Obr. 67 Struktura základní oblasti oceli SSAB Laser 355 MC [23].

7.6 Vyhodnocení mikro struktury v tepelně ovlivněné oblasti.

Pro dosažení podrobnějších informací o struktuře v tepelně ovlivněné oblasti, byly vytvořeny velmi detailní fotografie (zvětšeno 50 x) z metalografických výbrusů. Pro toto porovnání byli vybráni dva zástupci z vybrané čtveřice vzorků, u kterého byla použita stejná 10" fokusační čočka. Jedná se tedy o vzorek č. 14 za materiál TATA STEEL S355MC a vzorek č. 16 za materiál SSAB Laser 355 MC Plus.



Obr. 68 Struktura tepelně ovlivněné oblasti oceli TATA STEEL S 355MC [23].

Na obrázku č. 68 je vidět struktura tepelně ovlivněné oblasti oceli TATA STEEL. Z obrázku je patrné nežádoucí zbarvení horní vrstvy a také místy nejtmaší fleky, které jsou artefakty od poleptání kyseliny dusičné HNO_3 . V důsledku rychlosti ochlazování vznikla zakalená struktura (martenzitická, místy pravděpodobně i bainitická). Místy je také vidět proeutektoidní ferit (světlá místa).



Obr. 69 Struktura tepelně ovlivněné oblasti oceli SSAB Laser 355 MC [23].

Na fotografii č. 69 je znázorněná struktura tepelně ovlivněné oblasti oceli SSAB Laser. Horní vrstva v tomto případě již není tolik poleptána kyselinou dusičnou HNO_3 . Opět zde došlo v důsledku rychlosti ochlazování ke vzniku zakalené struktury.

7.7 Posouzení tvrdosti vzorků

Za účelem zjištění a posouzení tvrdosti u vybraných vzorků byla provedena statická zkouška tvrdosti podle Vickerse. Zkouška byla provedena na tvrdoměru Zwick 3212 vybaveným kamerou pro přesné snímání vzorku viz obr. 70. Principem této zkoušky je vtlačování pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° do povrchu součásti. Doba vtlačování je v rozmezí 12 – 15 s. Poté jsou měřeny obě úhlopříčky vtisku, které zůstanou po odlehčení induktoru. Následně se určí střední hodnota a počítač stanoví hodnotu tvrdosti HV. Zatížení bylo zvoleno 5 kg – HV5, které odpovídá 49,03 N. Pro měření drsnosti byl vybrán metalografický výbrus vzorku č. 14 od materiálu TATA STEEL S355MC a výbrus vzorku č. 16 od materiálu SSAB LASER 355 MC Plus [67, 68].



Obr. 70 Tvrdoměr Zwick 3212 vybavený kamerou.

U každého vzorku byly provedeny tři vpichy v tepelně ovlivněné oblasti. Vpich č. 1 byl proveden v oblasti horní hrany řezu. Vpich č. 2 byl proveden v polovině šířky řezu a vpich č. 3 byl proveden v oblasti dolní hrany řezu. Čtvrtý vpich byl proveden v základní (tepelně neovlivněné) části materiálu. Naměřené hodnoty byly zaznamenány v tabulce č. 28.

Tab. 28 Hodnoty tvrdosti HV5 vzorků obou typů ocelí.

Tvrdost HV5	Vpich v základním materiálu [HV]			Průměr hodnot	Vpichy v tepelně ovlivněném místě [HV]			Průměr hodnot
	Vpich č. 1	Vpich č. 2	Vpich č. 3		Vpich č. 1	Vpich č. 2	Vpich č. 3	
TATA STEEL 355MC	120	114	123	119	154	158	156	156
SSAB Laser 355 MC Plus	97	96	97	96,7	163	171	172	168,7

Z výše uvedené tabulky je patrné, že menší hodnoty tvrdosti v základním materiálu má materiál SSAB Laser, což je způsobeno kvůli řádkovosti vyloučeného perlitu. Hodnoty tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti vykazuje opět materiál SSAB Laser, což je způsobené vyšším obsahem uhlíku.

8 TECHNICKO – EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Pro ekonomické vyhodnocení je zásadní hodinová sazba laseru, která činí 2340 Kč [70]. Tato cena se skládá z těchto položek [69]:

- Odpisy/leasing,
- Elektrická energie,
- Média (řezné plyny, stlačený vzduch),
- Mzda operátora,
- Nástroje,
- Spotřební díly,
- Servis údržba,
- Režie (provoz firmy),
- Zisk,
- Efektivita výroby.

Mezi konstantní položky patří odpisy, (týkající se jednotkové ceny stroje, doby odpisů, odpracovaných hodin, počtu pracovních hodin za rok) a mzda obsluhy stoje. Spotřebovaná elektrická energie spolu s řeznými plyny a stlačeným vzduchem lze také považovat za konstantní hodnoty, jelikož u vybraných zástupců vzorků uvedených v tabulce č. 29 mají téměř totožnou hodnotu. Položky servisní údržby, spotřebovaných dílů vychází ze zkušeností provozu. Na výslednou cenu výrobku má tedy největší vliv změna řezné rychlosti. V níže uvedené tabulce je srovnání čtyřech zástupců ze sady vzorků – SSAB při použití 10" čočky. Srovnání je z hlediska různých řezných rychlostí a také dle nejlepších parametrů drsnosti Ra a Rz.

Tab. 29 Technicko – ekonomické srovnání 4 vzorků.

Vybrání zástupci sady vzorků SSAB – 10" čočkou	Vzorek č. 1	Vzorek č. 6	Vzorek č. 12	Vzorek č. 16
Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	0,5	0,55	0,6	0,65
Cena 1 m [Kč.m ⁻¹]	78	70,9	65	60
Ra [μm]	3,13	2,87	2,62	2,3
Rz5 [μm]	14,48	14,15	12,97	11,93
Celkové výrobní náklady na 1 ks vzorku [Kč]	40,95	38,35	36,4	35,1
Celkové výrobní náklady na 1000 ks vzorků [Kč]	40950	38350	36400	35100

V tabulce jsou dále vypočteny výrobní náklady 1 kusu vzorku a náklady na 1000 kusů vzorků pro různé velikosti řezných rychlostí. Z tabulky tedy vylívá, že s rostoucí řeznou rychlostí zároveň klesají parametry drsnosti Ra a Rz5 a také klesají výrobní náklady.

9 DISKUZE

Charakteristikou výrobního procesu je důležitá jednak produktivita, ale také výsledná kvalita při řezání laserem. Správné nastavení řezných parametrů je důležité. Velmi významnou roli hraje správná poloha ohniska laserového paprsku mající dopad na kvalitu řezané plochy [71].

Z experimentálního ověření lze usoudit, že vysoké hodnoty tlaku řezného plynu negativně ovlivňují kvalitu řezu, bez ohledu na ostatní parametry jako jsou řezná rychlost a výkon laseru.

Dále lze usoudit, že bez ohledu na použitý druh zvolených materiálu (TATA STEEL – SSAB LASER) tl. 20 mm, bylo dosaženo lepší kvality povrchu řezu u vzorků vypálených 10" čočkou.

Pro výpočet celkových výrobních nákladů pro 1 ks vzorků, byla také započtena doba pulzního vpichu, která činila 24 s. Tato doba se tedy negativně projevila na těchto nákladech. Snížením této doby by mohlo být použítí kontinuálního vpichu (nepřetržité generování laserového záření), nicméně tento způsob by mohl způsobit „explozi“ v místě vpichu, kde by poté zbyla velká díra. V daném místě by se tepelně ovlivnila větší oblast, což není žádoucí. Také by došlo k znečištění trysky.

9.1 Návrh na zlepšení experimentu

V průběhu vyřezávání vzorků docházelo ve velké míře k širokému řezu, což bylo způsobeno vyřezáváním vzorků v řadě za sebou, kdy došlo vždy u dalšího vzorku u přilehlé strany k zapálení boků. K tomu docházelo téměř u všech vzorků nezávisle na použitém druhu materiálu při použití 7,5" čočky. V případě 10" čočky k tomu docházelo jen při neoptimálně nastavených řezných parametrech. Možným řešením, jak předejít tomuto nežádoucímu jevu je vyřezávání vzorků v nepravidelném pořadí. Tím by docházelo k menšímu ohřevu plechu, tudíž k minimalizaci zapálení boků vzorků.

ZÁVĚR

V této diplomové práci byl vytvořen návrh experimentu podle Taguchiho metody na optimalizaci výroby součástí z konstrukční oceli tl. 20 mm technologií laserového dělení. Na tento experiment byly použity dva druhy materiálu. První – TATA STEEL S355MC a druhý – SSAB LASER 355 MC Plus. K realizaci experimentu došlo ve firmě HORÁCKÉ KOVODRUŽSTVO Třebíč na CO₂ laseru Amada LC F1-NT. Z hodnot nultého vzorku se vycházelo pro určení proměnných řezných parametrů, které byly: řezná rychlost, výkon a tlak řezného plynu. Tyto nadefinované parametry pak byly dle Taguchiho metody zkombinovány do čtyř sad vzorků. U každého materiálu došlo k vyřezání sady vzorků pomocí 7,5" a 10" čočky. Měření kvality řezných ploch dle parametrů drsnosti Ra a Rz bylo provedeno v laboratoři Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně. Dále došlo ke grafickému vyhodnocení vzorků dle normy ČSN EN 9013. Poté byl vybrán nejlepší zástupce dle dosažené kvality řezu z každé sady vzorků. U těchto čtyřech stanovených zástupců došlo k vyhodnocení tepelně ovlivněné oblasti. Následně byla zhodnocena mikro struktura vzorků v základní oblasti obou materiálů. Poté mikrostruktura v tepelně ovlivněné oblasti, po které došlo k vyhodnocení vzorků dle jejich tvrdosti. V závěru bylo stanoveno technicko – ekonomické vyhodnocení.

Na základě vypracované diplomové práce byly zjištěny tyto skutečnosti:

- Vlivem zvětšení ohniskové vzdálenosti došlo ke zvětšení rozměru hloubky ostrosti (viz vzorec 3), což mělo za následek kvalitnější plochu řezu.
- Použitím 7,5" čočky (oproti 10" čočky) má za následek vyšší hodnotu drsnosti v horní části řezu a vznik vlnitosti v dolní části řezu. To je zapříčiněno vyšší polohou ohniskové roviny (směrem k horní hraně řezu). V dolní části řezu se tedy více projeví rozšiřující se laserový paprsek.
- Se zvětšením ohniskové vzdálenosti u 10" čočky došlo také ke zvětšení průměru laserového paprsku, to má za následek rozdělení energie laseru na větší plochu, tím tedy dojde k zmenšení tepelně ovlivněné oblasti od hrany řezu směrem do materiálu o 5 %.
- Nejlepší hodnoty dle parametrů drsnosti Ra 2,3 μ m a Rz5 11,93 μ m dosáhl vzorek č. 16 – materiálu SSAB LASER 355 MC vyřezaný pomocí 10" čočky, kde se ukázalo jako optimální s nejvyšší navolenou řeznou rychlostí, také nejvyšší hodnota výkonu laseru při nejnižším tlaku řezného plynu.
- Celkové náklady na výrobu 1000 ks vzorků (řezná rychlost 0,65 m.min⁻¹) poklesly na N_C = 35 100 Kč oproti nákladům (dle firemních řezné rychlosti 0,55 m.min⁻¹) na výrobu N_C = 38 350 Kč. To činí pokles nákladů na výrobu o 8 %.
- Všichni čtyři vyhodnocení zástupci dle parametrů drsnosti Ra a Rz jednotlivých sad vzorků, byli vyřezáni nejvyšší možnou řeznou rychlostí v rámci řezných podmínek experimentu. Jedná se tedy o neekonomičtější vzorky.

Snahou nabídnout zákazníkovi levnější cenu výroby zakázky, včetně dostatečné jakosti kvality je tedy zvýšení řezné rychlosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. LASCAM SYSTEMS S.R.O. *Rozdělení laserů* [online]. 2015 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
2. MM Průmyslové spektrum. *Trendy / Povrchové úpravy* [online]. 2010/3, [cit. - 2017-02-08]. ISSN 1212-5272. Dostupné z: : <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslu.html>
3. ROFIN. *Laser Cutting* [online]. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <https://www.rofin.com/en/applications/laser-cutting/>
4. DIRECT INDUSTRY. *Metal cutting machine / laser / CNC* [online]. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/amada/product-8254-1620144.html>
5. LAO. Základní princip laseru a jejich dělení [online]. [cit. 2017-02-13]. <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
6. LAO. Minulost a současnost. [online]. [cit. 2017-02-13]. <http://www.lao.cz/lao-info-49/vyuziti-laseru-v-prumyslu--minulost-a-soucasnost-313>
7. WORLD OF LASERS. History Of Lasers. [online]. [cit. 2017-02-14]. <http://www.worldoflasers.com/laserhistory.htm>
8. WIKIPEDIE. Laser. [online]. [cit. 2017-02-14]. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
9. Halliday, David – Resnick, Robert – Walker, Jearl: Fyzika Druhé přepracované české vydání osvědčené vysokoškolské učebnice, svazek 2, přes 600 stran, ISBN 978-80-214-4123-1,
10. Navrátil Leoš, a kolektiv: Nové pohledy na neinvazivní laser vysokoškolské učebnice, 2015, 172 stran, ISBN 978-80-247-5928-9.
11. STEEN, William. Laser material processing. Springer. 2nd edition. Londýn : Springer, 1998. 346 s. ISBN 3-540-76174-8.
12. WIKIPEDIE. Laser. [online]. [cit. 2017-02-14]. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
13. MEGABLOG. Schéma optického rezonátoru. [online]. [cit. 2017-02-13]. <http://www.mega-blog.cz/lasery/co-byste-radi-vedeli-o-prumyslovych-laserech/>
14. Laser processing: CO2 laser. TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG. 02/2007 s. 156 dostupné z: <http://www.trumpf-machines.com/en/about-trumpf/media-center/library/laser-andlaser-processing.html>
15. WIKIPEDIE. Koherence. [online]. [cit. 2017-02-16]. [https://cs.wikipedia.org/wiki/Koherence_\(vln%C4%9Bn%C3%AD\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Koherence_(vln%C4%9Bn%C3%AD))
16. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008-03-18 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>

17. MM Průmyslové spektrum [online]. 2011-09-07 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
18. WIKISKRIPTA. Typy laserů [online]. 2016 [cit. 2017-02-019]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Typy_laser%C5%AF
19. LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. Společná laboratoř optiky [online]. Univerzita Palackého v Olomouci. 2010 [cit. 2017-02-12] <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
20. MINAŘÍK, Václav. Technologické lasery. Česká svářečská společnost ANB [online]. 29.12.2007 [vid. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
21. MM Průmyslové spektrum. Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser? [online]. 2007/3, s. 72 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: : <http://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser.html>
22. TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen, Germany. *Fascination of střet metal. Laser cutting*. 2006. ISBN 978-3-8343-3071-0
23. MRŇA, Libor. *Konzultace*. Brno, 2016.
24. MM Průmyslové spektrum. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi>
25. MEGABLOG. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu [online]. [cit. 2017-03-04]. <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
26. TRUMPF. *TRUMPF Česká Republika* [online]. 2017 [vid. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs.html>
27. RP PHOTONICS ENCYCLOPEDIA. *Fiber-Based High Power Laser Systems*. [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/highpowerfiberlasers.html>
28. Základy laserové techniky. *Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techiky_2013__mrna.pdf
29. DOČEKAL, Miroslav. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb - YAG*. Brno, 2013. 51 s, 9 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
30. LEONARDO TECHNOLOGY. *Možné dělení typů a druhů laserů*. [online]. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
31. SUNET. *Laser diode array*. [online]. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: https://www.sunet.se/wp-content/uploads/2015/09/Laser_diode_array.jpg

32. WELDING.CZ, *Laser ve strojírenství*. [online]. 2010-05-10 [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/laser.htm>
33. ARAMIS. Laserové svařování. [online]. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://aramiscorp.cz/laserove-svarovani.html>
34. LINTECH. *Laserové svařování*. [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-svarovani-b>
35. LASCAM. *Informace o laserovém kalení*. [online]. 2015 [vid. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/laserove-kaleni/>
36. LASCAM. Lasery pro navařování. [online]. [vid. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/aplikace/navarovani/>
37. LASCAM. Lasery pro řezání. [online]. 2015 [vid. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/aplikace/rezani/>
38. Principles of laser materials processing / Elijah Kannatey-Asibu, Jr. 2009, 838 s, ISBN 978-0-470-17798-3.
39. LCV. Řezání a vrtání. [online]. [vid. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://lcv.cz/rezani-a-vrtani>
40. MRŇA, Libor. Technologie využívající laser [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/
41. LASEROVÉ ŘEZÁNÍ. Volba a vlastnosti asistenčních plynů. 2014 [vid. 2017-03-21]. Dostupné z: http://old.messergroup.com/cz/Tisk/Archiv2014/Laserove_rezani_volba_a_vlastnosti_asistencnich_plynu.pdf
42. LASCAM SYSTEMS S.R.O. *Základní rozdělení laserového řezání*. [online]. 2017 [cit. 2017-02-17]. <http://www.lascam.cz/zakladni-rozdeleni-laseroveho-rezani/>
43. VACULKA, Jakub. *Měření drsnosti hran při laserovém dělení kovů* [online]. Brno, 2012, 2012 [cit. 2013-02-25]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5146/2012_BP_Vaculka_Jakub_126436.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Vysoké učení technické Brno. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
44. AMADA. *Cutting Know-how for Amada lasers*. Schaumburg, 2011. Dostupné z: <http://www.amada.com/>
45. CHMELÍČKOVÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. 2010 Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AVČR [cit. 2017-02-17]
46. PODANÝ, P. Porovnání drsnosti řezných hran při dělení materiálu CO₂ a YbYAG laserem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. XY 47 s, 9 příloh, CD. Vedoucí bakalářské práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D..
47. Laserové a plazmové řezání (84, 83) *Výhody a nevýhody laserového řezání*, 13 s. dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>

48. PRECIZ, S.R.O. *Převodní materiálu* [online]. 2012 [cit. 2017-03-03]. Dostupné z: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.0570>
49. TATA STEEL. *Ympress® Laser S355MC* [online]. 2017 [cit. 2017-03-03]. Dostupné z: https://www.tatasteeleurope.com/static_files/Downloads/General%20Industry%20Strip/Strip%20Products/English/Tata%20Steel%20-%20YMPRESS%20LASER%20S355MC%20-%20data%20sheet%20EN.pdf
50. SSAB. *SSAB laser 355MC Plus* [online]. 2017 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/brands/ssab-laser-plus/products/ssab-laser-355mc-plus>
51. TICHÁ, Šárka. *Strojírenská Metrologie: Část 1* [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
52. Roughness measurements of stainless steel surfaces. Introduction povrchu [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/RoughnessMeasurement_EN.pdf
53. SLIDE PLAYER. *Integrita obráběného povrchu* [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: http://images.slideplayer.cz/7/1913161/slides/slide_26.jpg
54. AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J.: *Technologie svařování a zařízení*, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0
55. ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. 1. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2003.
56. NOVOHRADSKÝ, Jan. *Porovnání vybraných statistických metod pro hodnocení jakosti*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Strojní inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Jana KLEINOVÁ, CSc.
57. Orthogonal Arrays (Taguchi Designs). The University of York: Department of Mathematics [online]. York, Spojené království, 2004 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.york.ac.uk/depts/math/tables/orthogonal.htm>
58. SMELIKOVÁ, Lenka. *Kontrola kvality pájeného spoje a Design of Experiments u strojního pájení vlnou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014, 73, 15 l. : fot., grafy, tabulky CD-ROM. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. JIRÍ STARÝ, Ph.D .
59. TOŠENOVSKÝ J.: *Plánování experimentů*, Technická univerzita Ostrava, 2012, 230 ISBN 978-80-248-2592-2 Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/DOE/Planovani%20experimentu.pdf>
60. HORÁCKÉ KOVODRUŽSTVO TŘEBÍČ. *Historie* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.hkdtrebic.cz/historie-firmy.html>
61. STEMA-TECH S.R.O. *LC-F1 NT* [online]. [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <http://stemattech.cz/nase-nabidka/lc-f1-nt/>

62. AMADA. *Laserová řezačka LC-F1 NT*. Haan, 2008, 12 s. Dostupné z: <http://www.amada.sk/documents/produkt-25-lc-f1-nt-cz.pdf>
63. HORÁCKÉ KOVODRUŽSTVO TŘEBÍČ. *Dodací list materiálu TATA STEEL S355MC* In: Rokytnice nad Rokytnou, 2017.
64. HORÁCKÉ KOVODRUŽSTVO TŘEBÍČ. *Dodací list materiálu SSAB LASER 355 MC PLUS* In: Rokytnice nad Rokytnou, 2017.
65. TONKOVIČ, Miroslav. *Analýza materiálu pro laserového řezání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
66. MAHR. *MARSURF M 300*. [online] [cit. 2017-03-24] Dostupné z: <http://www.msi-viking.com/assets/images/downloads/productspecsheets/MahrSpecSheets/MarSurf%20M%20300%20SET%20download.pdf>
67. MEDUNA. Měření tvrdosti. [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.kalirna.cz/cz/sluzby/item/36-mereni-tvrdosti.html>
68. SPS-VITKOVICE. *HV zkouška tvrdosti podle Vickerse*. [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/KOM/KOM_3_11_SPU-mereni_tvrdosti_2.pdf
69. MRŇA, Libor. *Ekonomika technologií*. Brno, 2016, 6 s. [cit. 2017-05-08].
70. HORÁCKÉ KOVODRUŽSTVO TŘEBÍČ, *Konzultace*. Rokytnice nad Rokytnou, 2017.
71. THOMBANSEN, Ulrich, Torsten HERMANN a Stoyan STOYANOV. Setup and Maintenance of Manufacturing Quality in CO2 Laser Cutting. *Procedia CIRP* [online]. Elsevier B.V, 2014, 20, 98-102 [cit. 2017-05-01]. DOI: 10.1016/j.procir.2014.05.037. ISSN 2212-8271.
72. Computational Dynamics of Anti-Corrosion Performance of Laser Alloyed Metallic Materials. *By Olawale S. Fatoba, Patricia A.I. Popoola, Sisa L. Pityana and Olanrewaju S. Adesina*. DOI: 10.5772/62334

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
A	[mm]	jmenovitý rozměr dokončeného dílu
A ₈₀	[%]	tažnost materiálu
a	[mm]	tloušťka materiálu
B	[mm]	jmenovitý rozměr uříznutého dílu,
BPP	[-]	Beam Parameter Product
B _z	[mm]	přídavek na opracování,
CW	[-]	pulzní režim laseru
C _{ev}	[%]	uhlíkový ekvivalent materiálu
D _o	[mm]	průměr výstupního laserového svazku
D _{foc}	[mm]	průměr výstupního fokusovaného laserového paprsku
F	["]	ohnisková vzdálenost
G _o	[mm]	horní mezní úchylka,
G _u	[mm]	dolní mezní úchylka,
HV5	[-]	tvrdost dle Vickerse, zatížení 5 kg
j	[-]	počet úrovní faktorů
k	[-]	počet zvolených faktorů
LASER	[-]	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesílení světla stimulovanou emisí záření)
LED	[-]	luminiscenční dioda
l _n	[mm]	vyhodnocovaná délka měření drsnosti
l _r	[mm]	základní délka měření drsnosti
M ²	[-]	faktor kvality svazku
Nc	[Kč]	celkové náklady na výrobu
n	[-]	faktorový experiment
P-N	[-]	polovodičové rozhraní, PN přechod
p	[-]	stupeň snížení
QCW	[-]	kvazipulsní režim laseru
R _{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
R _m	[MPa]	pevnost v tahu materiálu
R _a	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
R _t	[μm]	maximum výšky základního profilu v rozsahu vyhodnocované délky měření drsnosti
R _z	[μm]	maximum výšky základního profilu
R _{z5}	[μm]	průměrná výška 5 základních výšek profilu
TEM ₀₀	[-]	módová struktura paprsku laseru
TEM ₀₁	[-]	módová struktura paprsku laseru
u	[mm]	úchylka kolmosti řezu v rovině dle normy
YAG	[-]	yttriový hlinitý granát (Y ₃ Al ₅ O ₁₂)
Z _f	[mm]	hloubka ostrosti
Z _p	[μm]	nejvyšší výstupek profilu
Z _v	[μm]	nejnižší prohlubeň profilu

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
\varnothing	[mm]	průměr
λ	[m]	vlnová délka svazku
Δa	[mm]	zmenšení vyhodnocované tloušťky řezu
π	[-]	matematická konstanta

Seznam prvků periodické tabulky

Zkratka	Název
Al	hliník
Ar	argon
C	uhlík
Cr	chrom
Cu	měď
Er	erbium
Mn	mangan
Mo	molybden
N	dusík
Nb	niob
Ni	nikl
O	kyslík
P	fosfor
S	síra
Si	křemík
Sn	cín
Ti	titan
Tm	thulium
V	vanad
Yb	ytterbium

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Materiálový list oceli TATA STEEL S355MC.....	1/1
Příloha 2 Materiálový list oceli SSAB Laser 355 MC Plus.....	3/3

SSAB		VASTAANOTTODISTUS INSPECTION CERTIFICATE				1/3	
EN 10 804-3.1 (2004)		A 12628 -001		28.02.2016		30.03.2016	
Theoretical Order Confirmation		Additional details		Shipping mark		Manufacturer's mark of the Manufacturer	
Material	12628	Lot	31	Weight	21540	Inspection date	30.03.2016
Product	HEAVY PLATES	Grade	EN 10028-3/10 CLASS A	Thickness	30	Manufacturer's mark	
Part description	HEAVY PLATES LASER 358 MC PLUS LAMINATED, QUENCHED & TEMPERED, FINE GRAIN STEEL FOR LASERPLASMA CUTTING SUPPLY CONDITION MM 10 163-2:2005 CLASS A3						
Part No.	010	Weight	12	Net weight	8625	Net weight	8625
Part No.	010	Weight	4	Net weight	4320	Net weight	4320
Part No.	010	Weight	12	Net weight	8595	Net weight	8595
Total		Weight	30	Net weight	21540		
Please refer to the order confirmation for the material specification and the terms of the order confirmation.							
MIRKA VALKAMA Head of Department							
Ykkö Steel Works		Ykkö Steel Works P.O. Box 100 FIN-01101 VESPA, FINLAND					

SSAB		ANALYYSITOISTUS ANALYSIS CERTIFICATE ANALYSEBESCHENKUNG COMPOSITO CHIMIQUE CERTIFICAT CEPTIMHEAT ANALYZA													3/3
Order No.		A 12628 -001													30.03.2016
Contract No.		30.03.2016													MEK
Material No.		48444													
Grade		S19													
Thickness		.32													
Width		.005													
Length		1.37													
Weight		.013													
Tensile strength		.003													
Yield strength		.042													
Elongation		.025													
Reduction of area		.010													
Impact energy		.012													
Charpy temperature		5.04													
C		.003													
Mn															
P															
S															
Al															
Ni															
V															
Cu															
Cr															
Ni															
Mo															

CSQ-CMMS-CR-MD-VYS-PE-CEPH

Swedish Steel Works

Product description: **Swedish Steel Works**

Steel manufactured and supplied by Swedish Steel Works to meet customer requirements on delivery of steel products. Swedish Steel Works is not responsible for any other requirements.

M. Vakkari

MINNA VALKAMA
Authorized inspection representative

Order reference: **SSAB 12628-001** Order address: **P.O. Box 15, FIN-00015, FINLAND** Product telephone: **020 2011** Telephone telex: **020 201 270** Vakkari telephone: **020 201 270**