



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

HODNOCENÍ JAKOSTI LASEROVÝCH ŘEZNÝCH PLOCH

EVALUATION OF THE QUALITY OF LASER CUTTING SURFACES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Krejčířík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček, IWE

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Marek Krejčířík
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jaroslav Kubiček, IWE
Akademický rok:	2022/23

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:

Hodnocení jakosti laserových řezných ploch

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jakost řezných ploch je důležitá z hlediska následných operací. Norma ČSN EN ISO 9013 – Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – definuje jakost řezných ploch pro tři technologie – laser, plazmu a řezání kyslíkem. DP řeší porovnání jakosti řezných ploch daných technologií u vysokopevnostní oceli IMEX 700. Primárním zadáním DP je srovnání kvality a rychlosti řezů u plynového a pevnolátkového laseru.

Cíle diplomové práce:

- vypracování literární studie zaměřené na řešenou problematiku,
- návrh experimentu,
- provedení experimentu,
- vyhodnocení řezných ploch dle ČSN EN ISO 9013.

Seznam doporučené literatury:

ASM handbook Welding, brazing, and soldering Volume 6. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.

BENKO,B. a kol. Laserové technológie, Technická universita, Bratislava 2000, ISBN 80-227-1425-9.

TURŇA,M. Špeciálne metódy zvárania, 1vyd. ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-000097-9.

KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0.

KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5.

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Řešeným problémem této diplomové práce, jak plyne i z jejího názvu, byl popis a zhodnocení technologie CO₂ a fiber laserového dělení a následné porovnání s technologiemi plazmového a kyslíkového dělení, které popisuje norma ČSN EN ISO 9013. Pro práci byly použity vzorky vysokopevnostní jemnozrnné oceli IMEX 700 s mezí kluzu 690 MPa, kdy následně bylo u těchto vzorků provedeno hodnocení výsledné jakosti. Práce je rozdělena do dvou částí – teoretické a experimentální. V teoretické části byla věnována pozornost hlavní náplni diplomové práce, laseru. Mimo jiné byl diskutován i princip plazmového a kyslíkového dělení, u nichž byl v experimentu proveden rozbor a srovnání řezných hran vzorků vyřezaných právě těmito metodami. V neposlední řadě byla v teoretické části rozebrána i podstata povrchové drsnosti, materiálové tvrdosti a způsoby jejich měření. V experimentální části byly zhodnoceny výsledné řezy po laserovém, plazmovém a kyslíkovém dělení, které byly následně porovnány. U jednotlivých řezů byla porovnávána drsnost, a za pomoci normy ČSN EN ISO 9013 byly tyto naměřené hodnoty zařazeny do příslušných jakostních tříd. Další sledované parametry byly tepelné ovlivnění řezné spáry, šířka tepelně ovlivněné oblasti a průběh tvrdosti. V závěru byly diskutovány a shrnuty poznatky a výsledky získané v experimentální části. Zkoumané technologie byly porovnány z hlediska ekonomického i z hlediska výsledné jakosti řezu. Jako nejlepší možná volba dělení po kvalitativní i ekonomické stránce bylo na základě experimentu stanoveno fiber laserové dělení.

Klíčová slova

tepelné dělení, CO₂ laser, fiber laser, plazma, řezání kyslíkem, vysokopevnostní ocel, drsnost, tvrdost

ABSTRACT

As the title implies, the topic to be solved in this diploma thesis was describing and evaluating the CO₂ and fiber laser cutting technologies and their comparison with plasma and oxygen cutting, described in the standard ČSN EN ISO 9013. Samples of IMEX 700 high-strength fine-grain steel with a yield strength of 690 MPa were used and subjected to a final quality assessment. The diploma thesis is divided into two parts – theoretical and experimental. The theoretical part is mainly focused on a laser. Among other things, the principle of plasma and oxygen cutting was discussed. The cutting edges of samples cut by these methods were analyzed and compared in an experiment. Last but not least, the surface roughness, material hardness, and their measurement methods were discussed in the theoretical part. The final cuts after laser, plasma, and oxygen cutting were evaluated and compared in the experimental part. The roughness of the individual cuts was compared, and measured values were classified into the relevant quality classes specified by the standard EN ISO 9013. The thermal influence of the cutting joint, the width of the thermally influenced area and the hardness history were further evaluated parameters. The obtained results were discussed and summarized in the conclusion. Studied technologies were compared. Based on the experiment, fiber laser cutting was determined as the best choice regarding quality and economics.

Keywords

thermal cutting, CO₂ laser, fiber laser, plasma, oxygene cutting, high-strength steel, roughness, hardness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍŘÍK, Marek. *Hodnocení jakosti laserových řezných ploch*. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149286>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Hodnocení jakosti laserových řezných ploch vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 26.5.2023

místo, datum

Marek Krejčířík

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Jaroslavovi Kubíčkovi, IWE za pomoc, vstřícnost, cenné rady a poskytnuté materiály. Dále touto cestou děkuji firmám LASERCORE s.r.o. a TRUMPF Praha, spol. s.r.o., které mi umožnily využít jejich laserovou techniku a poskytly mi své poznatky a mnohaleté zkušenostmi z praxe. Poděkování patří také doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. a ostatním akademickým pracovníkům fakulty, kteří mi pomohli a poskytli mi své odborné poznatky při vyhodnocování experimentu. Velké poděkování patří hlavně mé rodině, která za celých pět let studia na této škole byla mou oporou.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ŘEŠENÉHO PROBLÉMU	10
2 LASER	11
2.1 Fyzikální princip laserového paprsku.....	11
2.2 Klasifikace laserů	14
2.2.1 Pevnolátkové lasery	15
2.2.2 Plynové lasery.....	17
2.2.3 Polovodičové lasery.....	18
2.3 Laserová technologie.....	18
2.3.1 Laserové svařování	19
2.3.2 Laserové vrtání	20
2.3.3 Laserové povrchové zpracování	20
2.3.4 Laserové řezání.....	22
2.4 Jiné metody tepelného dělení spadající do normy ČSN EN ISO 9013	28
2.4.1 Metoda dělení kyslíkem.....	30
2.4.2 Metoda plazmového dělení.....	30
2.5 Měření jakosti materiálu.....	31
2.5.1 Povrchová drsnost.....	32
2.5.2 Tvrdost materiálu.....	34
2.6 Vysokopevnostní oceli	37
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
3.1 Měření hodnot parametrů drsnosti	42
3.2 Zhodnocení jakosti řezných hran podle normy ČSN EN ISO 9013.....	46
3.3 Měření tvrdosti	48
3.4 Zhodnocení makro a mikrostruktury	52
3.5 Vyhodnocení experimentu	58
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	60
ZÁVĚR.....	65

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh

ÚVOD

Přesnost je nedílnou součástí moderního strojírenství. Ve strojírenském průmyslu se technologie dělí do dvou kategorií – konvenčních a nekonvenčních. Rozdíl mezi oběma technologiemi spočívá v tom, že u nekonvenčních technologií se jedná o tzv. bezsilové působení nástroje na obrobek. Ke kontaktu s materiálem, dochází tedy třemi možnými způsoby a to tepelnými, chemickými nebo abrazivními účinky. Díky tomu se redukuje nároky na nástroje, které se méně opotřebovávají, výrazně se sníží strojní čas a zvýší se jakost technologicky zpracovávané plochy. Z hlediska ekonomiky obrábění jsou nekonvenční technologie v porovnání s konvenčními v rozporu a záleží, jaký počet součástí zákazník zvolí a také jaký je obráběný materiál, jelikož samotné nekonvenční technologie dokážou například obrábět i hůře obrobitelné materiály. Při konstrukci výrobci kladou převážně důraz na ekonomiku a ekologii stroje, která je v porovnání se starými stroji výrazná. Při volbě nekonvenční technologie je třeba si položit tři základní otázky, a to jaký materiál se obrábí, kolik kusů a jaká je potřebná kvalita. Mezi nekonvenční technologie patří například laser, plazma, kyslíkový plamen, vodní paprsek, elektroerozivní obrábění apod. [1; 2; 3]

Dominantní a také nejpřesnější nekonvenční technologie na trhu je bezesporu laserová technologie. Laserová technologie se za více než šedesát let své existence stala nedílnou součástí ve strojírenském, medicínském, vesmírném, vojenském nebo automatizačním průmyslu. Během této doby došlo k výrazné změně ekonomické či ekologické stránky. Stále vyšší nároky na přesnost v závislosti na jakosti nebo tvarové složitosti posunují laserovou technologii vpřed. Ve strojírenství laserová technologie postupně nahrazuje několik nekonvenčních technologií. V současnosti se využívá laserové dělení, které je hlavní náplní této práce a je zobrazené na obr. 1, dále zde patří laserové svařování, navařování, značení či gravírování, kalení apod. [1; 2; 3]



Obr. 1 Schéma laserového dělení [4].

1 ROZBOR ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

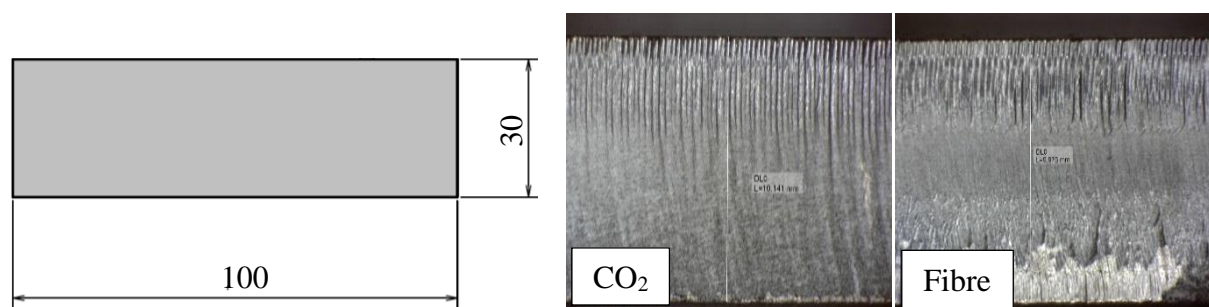
Práce se zabývá tepelným nekonvenčním dělením u technologií spadajících do normy ČSN EN ISO 9013, která je určena pro klasifikaci tepelného dělení, geometrických požadavků na díly a úchytky jakosti řezů pro laser, plazmu a plamen, na nízkouhlíkové konstrukční vysokopevnostní jemnozrnné svařitelné oceli s komerčním názvem IMEX 700 o tloušťce 10 mm, kterou definuje technicko-dodací předpis ČSN EN 10025-6 jako ocel S 690 QL (popis značení podle normy ČSN EN 10027-1) s minimální mezí kluzu 690 MPa (viz příloha 1). Ocel se nachází v zušlechtném stavu, tudíž tvrdost a houževnatost zaručuje kombinace martenzitického kalení a vysokoteplotního popouštění. Ocel je schopna odolávat nárazové práci do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Díky nízké hodnotě uhlíkového ekvivalentu, kde do výpočtu se zahrnuje procento legujících prvků, a jemnozrnné struktury materiálu, má IMEX 700 zaručenou svařitelnost. Předehřev materiálu je volen dle normy až od tloušťky 30 mm, kde se volí rozmezí teplot $100 \div 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. V tab. 1 je zobrazeno chemické složení dané oceli. [5; 6; 7; 8]

Tab. 1 Mechanické vlastnosti a chemické složení oceli IMEX 700 pro tloušťky do 50 mm [6; 7].

Ocel S 690 QL tloušťky 10 mm							
Mechanické vlastnosti	Min. mez kluzu Re [MPa]		Mez pevnosti Rm [MPa]			Tažnost A [%]	
		690		770 ÷ 940			14
Chemické složení (max %)	C	Si	Mn	Mo	Nb	Ni	Ti
	0,2	0,8	1,7	0,7	0,06	2,0	0,05
	S	P	V	N	B	Cr	Cu
	0,01	0,02	0,12	0,06	0,005	1,5	0,5

Mezi užití metody spadající do normy ČSN EN ISO 9013 patří laserové, plazmové a kyslíkové dělení, kdy hlavní náplní práce je porovnat laserové dělení u fibre a CO_2 laseru. Jak je patrné z obr. 2, na laseru se vyřezaly vzorky 100×30 mm a následně se porovnály jejich řezné hrany. Oba typy rezonátorů disponují svými výhodami v jiných směrech, a proto je cílem této práce přiblížit jejich výhody a nevýhody. Oba typy laserového dělení se dále porovnály s plazmovým a kyslíkovým dělením u zadaného materiálu. U těchto metod je dále cílem zkoumat řezné hrany právě za pomoci normy ČSN EN ISO 9013. [7]

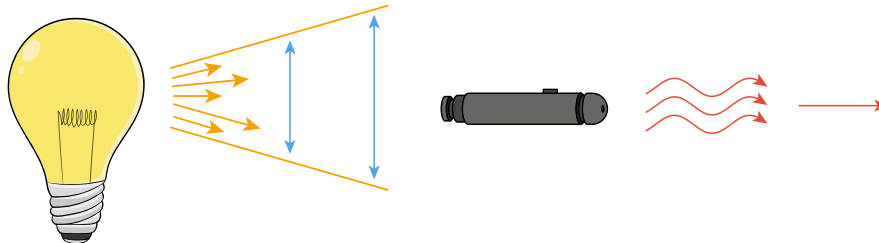
Zadání bylo vypracováno díky firmám LASERCORE s.r.o. a TRUMPF Praha, spol. s.r.o. Vyškovská firma LASERCORE s.r.o. již sedm let poskytuje na evropském trhu laserové dělení plechů spolu s jejich ohýbáním svařováním, broušením a aplikací povrchových úprav. Německá firma TRUMPF, s českou pobočkou sídlící v Praze, je největší světový výrobce laserových zařízení, jako jsou například 2D a 3D dělicí, svařovací a popisovací lasery na trubky a plechy nebo kombinované stroje, které kombinují laser s tvářecím lisem. Firma je také výrobcem tvářecích ohraňovacích lisů a 3D tiskáren. [4; 9]



Obr. 2 Schéma vzorku a makrostruktury u CO_2 a fibre laseru.

2 LASER

Pojem laser vychází z anglického slova „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, neboli zesílení světla pomocí stimulované emise. Jde o jisté optické vlnění spadající do skupiny elektromagnetického záření popsaný kvantovou fyzikou. Laserový paprsek je oproti jinému druhu záření charakteristický svou koherentností, monochromatickostí a směrovostí. Na obr. 3 je zobrazeno srovnání charakteru záření u žárovky (rozbíhávě) a u laseru (koherentní, monochromatické a směrové). [1; 2; 10]



Obr. 3 Srovnání záření u žárovky (nalevo) a u laseru (napravo) [11].

První zmínky o světelném paprsku bychom mohli hledat již ve starověkém Řecku, ovšem znalosti o světle jako takovém přiblížili až v 17. století fyzici Isaac Newton a Christian Huyghes. Newtonovi se podařilo rozložit ve skleněném hranolu bílé světlo na spektrum barev. Domníval se, že světlo má částicový charakter. V té době však jeho teorii dokázal vyvrátit holandský fyzik Huyghes, který tvrdil, že podstatou světla je vlnění. Tento spor rozhodl až ve 20. století Max Planc, který přišel s hypotézou, která popisuje světlo, které je tvořeno malými částicemi energie, neboli kvanty. Následné pokusy prokázaly, že energetické kvantum je úměrné frekvenci záření a také vlnové délce. Tyto výroky a pokusy se staly prvními základními kameny kvantové teorie. [2; 12; 13]

Počátky historie laseru začínají v roce 1916, kdy Albert Einstein ve své práci „Emise a absorpce světla podle kvantové teorie“ poprvé poukázal na možnost existence spontánní a stimulované emise. Jeho myšlenku použil a dále rozpracoval ruský fyzik V. A. Fabrikant, který ukázal na možnost využití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím. [2; 12; 13]

V roce 1953 byl vytvořený první, principiálně dnešnímu laseru podobný, zdroj koherentního mikrovlnného záření nazývaný jako „maser“. Autorem byl americký fyzik Ch. Townes spolu s J. P. Gordonem a H. J. Zeigerem. Zkonstruování maseru vedlo k vytvoření nového vědního oboru nazývaného kvantová elektronika. [2; 12; 13; 14]

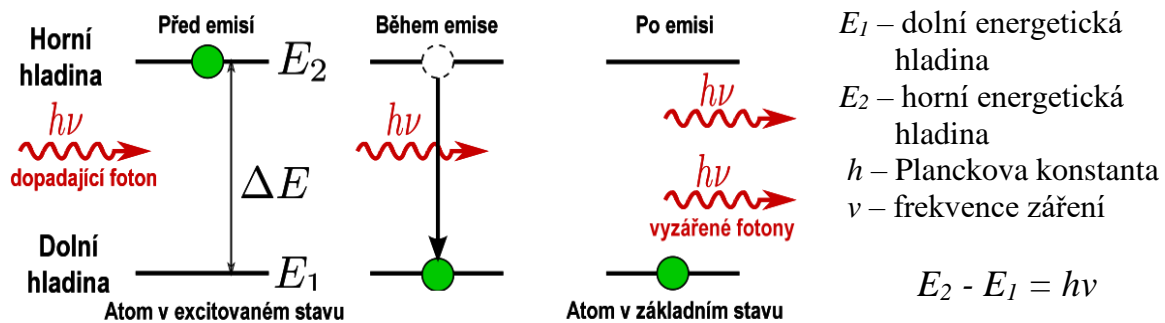
Během šesti let byl americkým fyzikem T. Maimanem zkonstruován historicky první laser, jehož aktivním prostředím byl krystal rubínu. Téhož roku vznikají první plynové a rubínové lasery a na konci šedesátých let se začala prakticky využívat vláknová optika. [2; 12; 13]

2.1 Fyzikální princip laserového paprsku

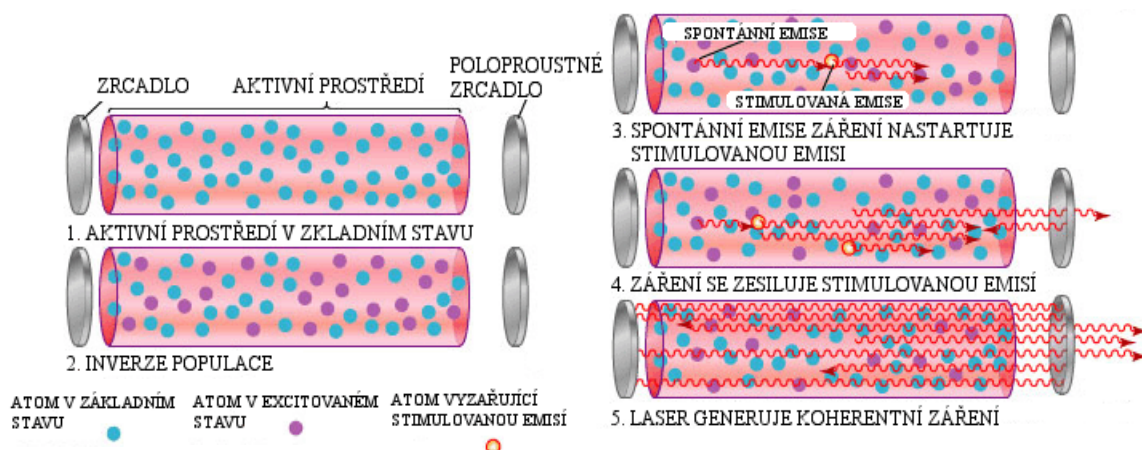
Pro vznik samotného laserového paprsku, je nutné zajistit vhodné podmínky. Tomu napomáhá optický rezonátor. Jde o nejdůležitější část, ve které dochází ke stimulované emisi s následným zvýšením intenzity vzniklých fotonů. V rezonátoru se nachází aktivní prostředí, které je umístěno mezi dvěma konkávními nebo konvexními zrcadly, z nichž jedno je odrazové (dielektrické) a druhé polopropustné. Polopropustné zrcadlo slouží k tomu, aby zajistilo stav, kdy nabuzený foton dosáhne takové intenzity, za pomoci stimulované emise, aby mohl toto polopropustné zrcadlo překonat a tím i opustit optický rezonátor. Aktivní prostředí je takové prostředí, ve kterém dochází k již zmíněné stimulované emisi za předpokladu, že je zajištěné dostatečné množství energie ve formě buzení buďto elektrickým výbojem,

anebo opticky. Aktivní prostředí může být tvořeno skupenstvím plynným, kapalným nebo pevným, Tato prostředí jsou nejčastěji využívány v laserech kapalinových, plynových, pevnolátkových nebo polovodičových. [1; 2; 10]

Podstata laseru jako takového spočívá ve stimulované emisi v aktivním prostředí rezonátoru pomocí buzení a následné excitaci atomu v kontaktu s nabuzeným fotonem, kdy dochází k přechodu energetického stavu atomu z hladiny nižší na hladinu vyšší. Z podrobnějšího hlediska (viz obr. 4 a 5) se jedná o děj, kdy v aktivním prostředí, ve kterém se nachází jistý kvantový systém (atomy, ionty nebo molekuly), dochází vlivem proudu fotonů vzniklým čerpáním (buzením) za pomoci diody nebo výbojky k absorpci fotonu o dané frekvenci atomem. Dojde k ději, kdy na atom působí z vnějšku energie fotonů. Tento děj vyvolá přechod elektronu z energetické hladiny nižší – E_1 na energetickou hladinu vyšší – E_2 . Elektron se tak dostane do stavu, který je nazýván jako excitovaný. Atomy se v této fázi nachází na tzv. metastabilní hladině, která je nežádoucí a atomy tak mají tendenci se po jisté době dostat zpět na nižší energetickou hladinu. Tento jev má za následek dva děje, a to spontánní nebo stimulovou emisi. Právě stimulovaná emise je příznivý jev pro zvýšení intenzity vyzářených fotonů, a hlavně finální laserový paprsek. Fotony, které jsou následně při tomto ději vyzářené jsou koherentní. [1; 2; 10; 12; 15; 16]



Obr. 4 Vznik stimulované emise [17].

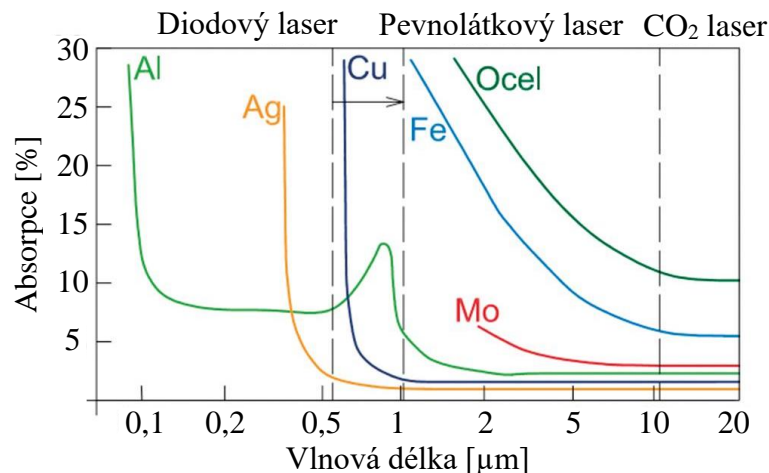


Obr. 5 Schéma vzniku záření v aktivním prostředí [18].

Laserem se tedy rozumí určitý kvantový zesilovač, který má ve svém českém názvu zakomponovaný právě pojem stimulovaná emise. Z hlediska fyzikálního principu jde o elektromagnetické záření, kdy dané optické vlnění paprsku má určitou charakteristickou vlnovou délku spadající do kategorie infračerveného záření, tedy od jiných druhů záření se liší pouze ve vlnové délce. Pomocí optiky lze laserový paprsek situovat do miniaturní plošky, kdy dosáhne vysoké hustoty energie dodávaného výkonu za předpokladu dopadu paprsku

na jednotku plochy v rozmezí od 10^4 do $10^8 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$. Mezi charakteristické vlastnosti laserového záření patří zejména koherentost, monochromaticnost, divergence a směrovost fotonů. Musí tedy platit, aby dané záření dané elektromagnetické vlny mělo stejnou fázi nebo fázi posunutou, stejný směr kmitání a stejnou frekvenci s nulovou rozbíhavostí, skládalo se pouze z jedné vlnové délky, a tudíž dané záření má pouze jednu barvu a aby proud fotonů umožňoval situovat veškerou svou energii do velmi malé plochy. [1; 2; 10; 16]

Nejdůležitější podmínkou, kterou materiál při laserovém působení musí prokazovat je absorpce, tedy pohlcení paprsku materiálem za účelem přeměny na teplo a následné tavení materiálu. Na absorpci má vliv především vlnová délka záření, úhel dopadu paprsku, materiálové vlastnosti s teplotou materiálu nebo stav spolu s drsností povrchu materiálu. Z grafu obr. 6 je patrné, že při použití stejného výkonu se zvětšující se vlnovou délkou absorpce materiálu klesá. V tab. 2 jsou pak zobrazená spektra elektromagnetického záření. [2; 10; 16]



Obr. 6 Graf absorpce laserového paprsku v závislosti na vlnové délce [19].

Další důležitý pojem pro laserový paprsek je módová struktura, označována jako TEM m_n (Transversal Electromagnetic Mode), jejíž podstatou je rozložení intenzity záření v prostoru. Písmena „ m “ a „ n “ označují jaký je počet minim na průřezu v daném souřadnicovém systému. Použije-li se kartézský souřadnicový systém, jedná se o souřadnice „ x “ a „ y “, pokud se použije cylindrický souřadnicový systém, pak se jedná o úhel a poloměr. Provede-li se příčný řez laserového paprsku, zjistí se, že intenzita energie záření v příčném průřezu, tedy módová struktura není rovnoměrně rozložena. Tato disbalance je ovlivněna především konstrukcí rezonátoru, mírou čistoty a polohy zrcadel nebo optiky laserového zařízení. Na samotný tvar paprsku má vliv především optika daného zařízení. [1; 20; 21; 22]

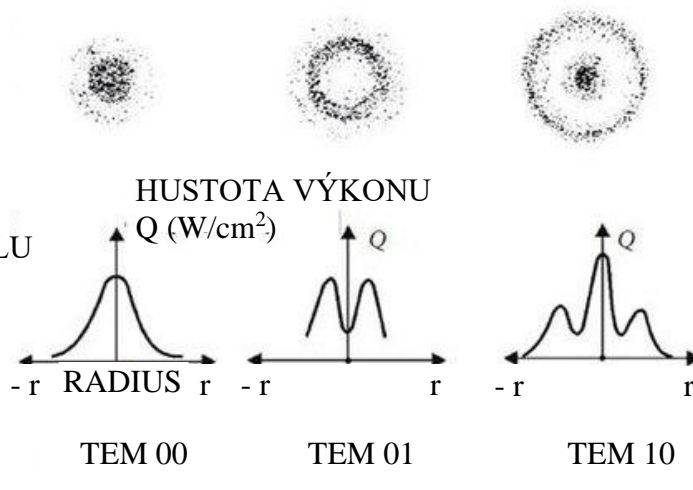
Nejvíce užívaná a také ideální módová struktura je označována jako TEM 00, někdy také nazývaná jako Gaussův mód. Jde o rotačně symetrické rozložení, při kterém se největší intenzita záření nachází na z -tové ose paprsku a postupně s narůstajícím poloměrem se snižuje. V podélném průřezu intenzity v závislosti na profilu paprsku vytváří tento mód Gaussovou křivku. V praxi je tento mód užívaný u laserů při řezání nebo svařování. Je díky němu možné koncentrovat veškerou energii na velmi malou plochu. Dalším často užívaným módem je TEM 01. Jedná se o mód tvaru prstence, který svou energii koncentruje na vnější stranu paprsku a na ose je jeho intenzita v podstatě nulová. [1; 20; 21; 22]

Pro laserové kalení se volí například mód zvaný Top Hat. Tento mód má větší dopadovou plochu, a tedy nižší intenzitu záření. Při laserovém kalení je zapotřebí, aby plocha paprsku byla co největší. Totéž platí i u laserového navařování. Co se týče hustoty výkonu laserového paprsku u řezání a svařování se jedná v řádu $\text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}$, kdežto u kalení a navařování v řádu $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$. Na obr. 7 jsou znázorněné typy nejčastěji užívaných módů. [1; 10; 20; 21; 22]

Tab. 2 Spektra elektromagnetického záření [17].

ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ	VLNOVÁ DÉLKA – λ	VYUŽITÍ
Rádiové záření	2000 m ÷ 0,1 m	televize, rozhlas
Mikrovlnné záření	0,1 m ÷ 0,3 mm	WiFi, mobilní telefony, mikrovlnné trouby
Infračervené záření	0,3 mm ÷ 750 nm	CO ₂ laser, dálkové ovladače
Viditelné záření	760 nm ÷ 390 nm	viditelné světlo
Ultrafialové záření	390 nm ÷ 10 nm	solárium, dezinfekce, přístroje ke kontrole dokladů
Rentgenové záření	10 nm ÷ 1 pm	lékařská a průmyslová diagnostika
Záření gama	< 300 pm	jaderná fyzika

ZOBRAZENÍ
INTENZITY
LASEROVÉHO
PAPRSKU



Obr. 7 Módová struktura paprsku [22].

2.2 Klasifikace laserů

Za více než 60 let existence prošel rezonátor rozsáhlými úpravami a změnami. Díky této evoluci dnes máme hned několik druhů laserových rezonátorů s odlišnými vlastnostmi. Princip laserových zařízení je totožný. U výrobce je možné si nakonfigurovat různé výkony rezonátorů, kdy nejsilnější možný výkon rezonátoru může dosahovat až 40 kW.

Rezonátory se liší zejména konstrukcí, realizací a dalšími aspekty jako jsou např.:

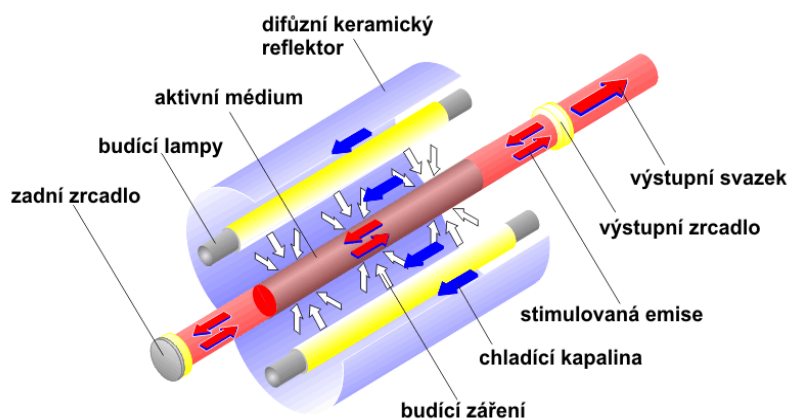
- skupenství aktivního prostředí (pevné, kapalné a plynné),
- typu buzení (optické – diody, elektrický výboj – AC/DC, chemické),
- vyzařované vlnové délky,
- použití (řezání, svařování, vrtání, kalení, ...).

2.2.1 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery neboli lasery dielektrické, patří do skupiny rezonátorů s aktivním prostředím, které tvoří pevná, opticky propustná, homogenní a uměle vyrobená látka ve formě monokrystalické nebo amorfni látky s příměsí vhodných aktivačních prvků (ionty). Mezi nejčastěji užívané aktivační prvky patří např. Cr, Ni, Nd, Sm nebo Yb. Tyto prvky jsou dodávány do uměle vyrobeného oxidu hlinitého (Al_2O_3) nebo fluoridu vápenatého (CaF_2). V praxi tento typ laseru může pracovat v různých režimech, kontinuálním nebo pulzním, za různých provozních podmínek bez potřeby časté údržby. Jejich vlnová délka spadá do oblasti infračerveného záření až viditelného světla. Na obr. 10 je zobrazené schéma typů pevnolátkových laserů. [1; 3; 20; 23; 24; 25]

Mezi pevnolátkové lasery patří například:

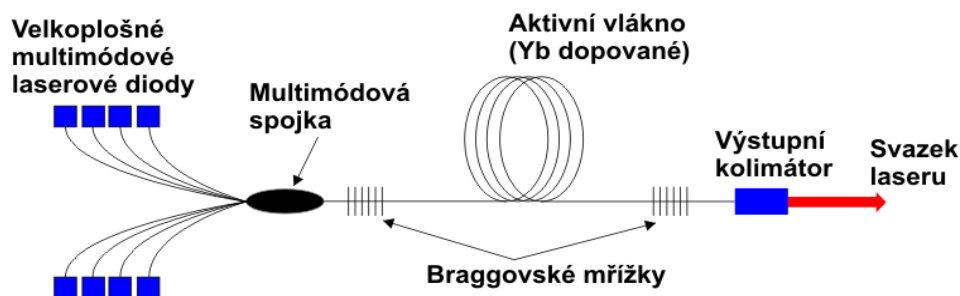
- Nd: YAG laser – jeden z nejčastěji užívaných pevnolátkových laserů, který je znázorněn na obr. 8, jehož aktivní prostředí tvoří opticky izotropní krystal kubické struktury Yttrium Aluminium (Yt-Al) granátu dopovaný aktivačními ionty Neodymia (Nd^{3+}). Tento krystal se v rezonátoru nachází ve formě tyče. Buzení zajišťují laserové diody. V dnešní době jsou ovšem Nd: YAG lasery nahrazovány optickými vlákny nebo disky za účelem zlepšení kvality laserového paprsku. Účinnost Nd: YAG laserů dosahuje k 5 %. [1; 3; 10; 20; 23; 24]



Obr. 8 Rezonátor pevnolátkového Nd: YAG laseru [26].

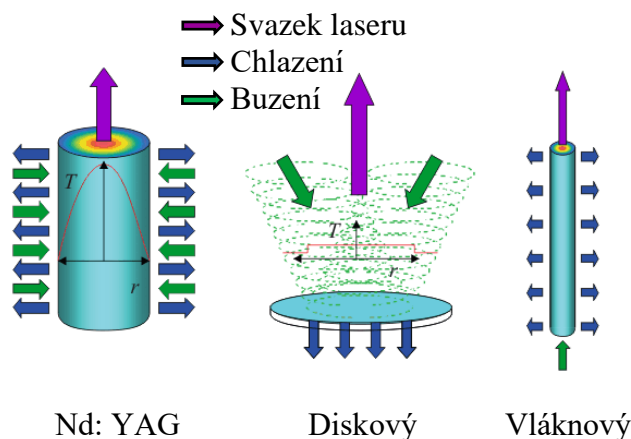
- Laser s optickými vlákny – laser, který je známý pod názvem jako fibre laser. Jedná se o nejmodernější typ laserového rezonátoru, u kterého je aktivní prostředí tvořeno optickými křemíkovými vlákny, která jsou dopována prvky vzácných zemin ze skupiny lanthanoidů. Jedná se nejčastěji o prvky erbia (Er), ytterbia (Yb) nebo thulia (Tm). Vznik paprsku v rezonátoru s optickými vlákny začíná buzením laserovými diodami. Buzení je vedeno přes multimódovou optickou spojku až do mřížky nazývané Braggovská. Braggovské mřížky jsou struktury tvořené přímo na jádře optického vlákna, jenž mají za úkol měnit index lomu světla. Plně tak nahrazují zrcadla v rezonátoru. Interakcí záření s mřížkou se spustí stimulovaná emise. Fotony se poté odrazy šíří celým vláknem až do části, kde se nachází znovu Braggovská mřížka, která převede záření do dalšího optického vlákna. Optické vlákno poté vede paprsek do optické hlavy, která je výstupní částí celého laserového zařízení. Fibre laser je v dnešní době na trhu dominantní v několika směrech. Je třeba zmínit jeho účinnost, která dosahuje 48 %. Nemá oproti konkurenčním rezonátorům velké tepelné ztráty a tím se snižují i vysoké nároky na chlazení. Chlazení probíhá za pomoci vody nebo vzduchu. Jako zajímavost je třeba zmínit fakt, který poukazuje na skutečnost lepšího chlazení aktivního prostředí a tím i zlepšení účinnosti fibre laseru v porovnání s Nd: YAG laserem, který má optická

vlákna nahrazena tyčí. Z jednoho vlákna je laser schopen vyprodukovat až 500 W. Při nižším výkonu okolo 100 W je možné fokusovat paprsek na hodnotu až 5 μm . Během provozu je možné převádět výkon do kteréhokoliv vlákna. Další výhodou je i schopnost řezat, svařovat nebo vrtat odrazivé materiály. Za posledních deset let se tento typ rezonátoru stal velmi vyhledávaným a v dnešní době je tak mezi výrobci boj o to, kdo vyrobí nejlepší, někdy i nejsilnější laser. Vláknové lasery pracují na jiné vlnové délce, než je oko schopno zdravě zpracovat, proto je při práci s vláknovým laserem nutné pracovat s UV filtrem na sklech stroje nebo na brýlích, jinak hrozí poškození oční sítnice, které může vést až k následnému oslepnutí. Tyto lasery se uplatní zejména ve strojírenství k řezání, svařování, vrtání nebo gravírování. Tento typ rezonátoru je zobrazen na obr. 9. [1; 4; 3; 10; 20; 23; 24; 25]



Obr. 9 Rezonátor pevnolátkového vláknového fibre laseru [18].

- Diskový laser – tak jako vláknový laser vznikl i diskový laser modifikací Nd: YAG laseru za účelem zlepšení vlastností pevnolátkového rezonátoru. Aktivní prostředí zde tvoří vybroušený krystal do tvaru disku o průměru až 100 mm a tloušťce desetin milimetru (viz obr. 10). Na rozdíl od Nd: YAG aktivního prostředí, je krystal u diskových laserů totožný, kromě dopovacího prvku, který je nahrazený ionty ytterbia. Aktivní prostředí nese tedy název Yb: YAG. Proces spočívá v použití vícenásobného budícího zařízení laserových diod, kde za použití odrazových zrcadel je paprsek namířený po odrazu na disk. Chlazení na zadní straně disku zajišťuje rovnoměrně rozložený teplotní gradient, který redukuje degradaci, nebo také depolarizaci paprsku. Účinnost tak dosahuje zhruba 20 %. Diskové lasery pracují na vlnové délce 1030 nm, což způsobují dopující prvky iontu ytterbia. S dopujícími prvky ionty neodymia vlnová délka dosahuje 1064 nm. Výrobci nabízí rezonátor o výkonu až 16 kW. Své uplatnění nalezne tento typ laseru zejména ve strojírenství u řezání, svařování a mikroobrábění. [3; 4; 10; 20; 23; 24; 20]



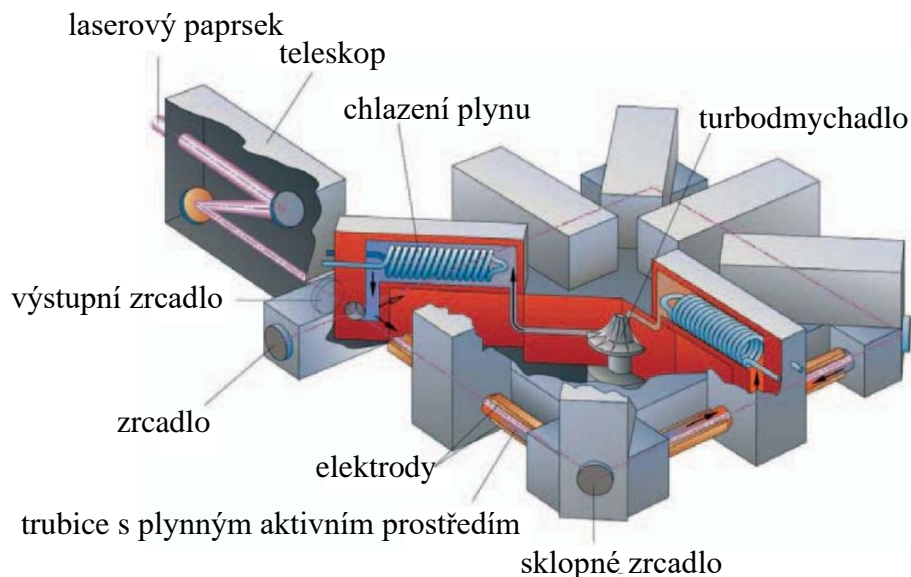
Obr. 10 Srovnání pevnolátkových laserů [26].

2.2.2 Plynové lasery

Nejvyužívanější typ laserového rezonátoru, v jehož aktivním prostředí se nachází atomy, ionty nebo molekuly plynu či směsi plynů a par. Plynové lasery pracují v kontinuálním a pulzním režimu s nízkou módovou strukturou svazku. Plyny mají obecně lepší homogenitu, díky které lze dosáhnout menší deformace optického svazku a tím lze získat i větší intenzitu paprsku. Buzení probíhá v několika metrových trubicích s vnitřním aktivním médiem, které jsou na koncích ohraničeny zrcadly. [1; 3; 4; 10; 23; 24; 25]

Nejvyužívanějším plynovým laserem je CO₂ laser. Jedná se o molekulární, ve strojírenství nejstarší, ale také stále nejpoužívanější typ rezonátoru, který je ovšem postupně nahrazován vláknovým fibre laserem. Aktivní prostředí tvoří molekuly oxidu uhličitého (CO₂), které doprovází molekuly helia (He) zajišťující lepší odvod tepla a molekuly dusíku (N₂) napomáhající k lepšímu buzení, které je radiofrekvenční nebo elektrické. Směs plynů, jak již bylo řečeno, proudí ve skleněné trubici. Tato trubice je ohraničena zrcadly a buzena elektrickými výboji. Aby vznikl co nejlepší možný paprsek, musí mít plyny v láhvi dodávané do rezonátoru co nejlepší možnou zaručenou čistotu. Celé zařízení je pak chlazené vodou nebo vzduchem za účelem odvodu tepla a zamezení poškození rezonátoru. [1; 3; 4; 10; 20; 23; 24; 25]

Existují dva druhy CO₂ rezonátorů a tím jsou rezonátory s příčným nebo podélným tokem plynu. Rezonátor s příčným tokem plynu patří svou konstrukcí ke kompaktním zařízením, u kterého paprsek, proud plynů a elektrické buzení proudí ve třech různých směrech. Konstrukce tohoto typu dovoluje nabídnout výkon až 20 kW. Kvalita paprsku je oproti rezonátoru s podélným tokem nižší. Rezonátor s podélným tokem je rezonátor, u něhož je tok plynu rovnoběžný se směrem paprsku a směrem normály zrcadel. Chlazení není příliš efektivní, na metr délky se nedosáhne více než 100 W. Z tohoto důvodu je tento typ rezonátoru výhodnější konstruovat delší pro vyprodukování požadovaného výkonu. Na obr. 11 je zobrazený typ CO₂ rezonátoru zkonstruovaný firmou TRUMPF. [1; 3; 4; 10; 23; 24; 25]



Obr. 11 TRUMPF TruFlow CO₂ rezonátor [4].

Výhodou strojírenského využití CO₂ laseru je především velká variabilita tlouštěk materiálů s výbornou kvalitou řezu, nehledě na druh materiálu, s omezením odrazivých materiálů, nebo například dosažení vyšších výkonů než u pevnolátkových laserů. Nevýhodou, jak již bylo řečeno, je téměř nemožnost pracovat s odrazivými materiály, a to z důvodu absorpce vlnové délky CO₂ laseru materiálem spolu s úhlem dopadu. Hrozí jinak zpětný odraz a následné trvalé

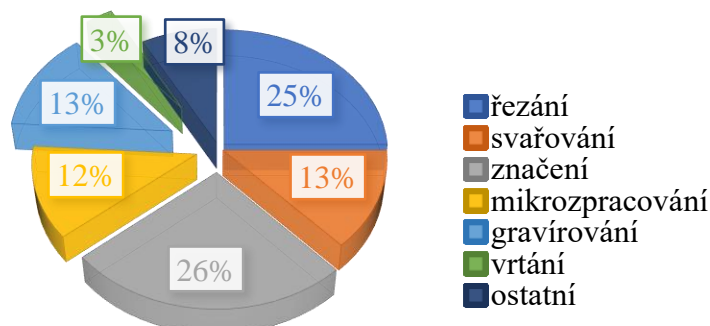
poškození rezonátoru, kdy oprava by u nových laserů vyšla na milióny korun. Pokud je tedy potřeba materiál obrábět nebo různě tepelně zpracovávat CO₂ laserem, doporučuje se materiál předem zdrsnit, na povrch nanést matnou barvu nebo fólii, tak aby se zredukovala potenciální šance poškození rezonátoru. Další nevýhodou je zejména menší produktivita spojená s rychlostí a nízkou účinností okolo 5 ÷ 10 %, která je zapříčiněna vysokým výdejem tepla a z tohoto důvodu jsou kladeny velké nároky na chlazení. CO₂ lasery se uplatní zejména ve strojírenství, a to u svařování nebo řezání. [1; 3; 4; 10; 23; 24; 25]

2.2.3 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery patří k nejnověji zkonstruovaným laserům dnešní doby. Jejich aktivním prostředím je polovodičový materiál, který je od běžného kovu odlišný tím, že s rostoucí teplotou polovodiče jeho vodivost roste, kdežto u kovu klesá. Aktivní prostředí tedy tvoří polovodičový materiál, který obsahuje volné nosiče náboje. Buzení probíhá za pomoci laserové diody. U polovodičových laserů je dominantní účinnost, která dosahuje 50 %. K dalším výhodám patří zejména regulovatelný výkon změnou elektrického proudu, dlouhá životnost nebo nízká provozní a pořizovací cena. Správným výběrem aktivního prostředí lze dosáhnout vlnové délky v rozmezí od 0,3 μm do 30 μm. Mezi nevýhody patří především velká rozbíhavost paprsku, která je závislá na teplotě aktivního prostředí. Polovodičové lasery naleznou využití například v medicíně, CD přehrávačích, laserových ukazovátkách a tiskárnách. Ve strojírenství se využívá ke svařování nebo kalení. [1; 10; 23; 24; 25]

2.3 Laserová technologie

Laserová technologie, patřící do nekonvenčních technologií, prošla za více než 60 let své existence několika inovacemi a našla uplatnění v řadě odvětví. Nekonvenční technologie je technologie, která pracuje na bázi tzv. bezsilového působení nástroje na obrobek. Nevyužívá se tedy rezný nástroj, pouze tepelná, chemická nebo abrazivní energie. Tudíž se netvoří ani tříska, tak jako u konvenčních technologií. Co se týče strojírenství, laserová technologie začíná postupně nahrazovat technologie konvenční, a to od vrtání, řezání až nově po 3D tisk. Technologie 3D tisku je stále ve výzkumné fázi, jelikož se jedná zatím o metodu finančně náročnou. Finální výrobek je navíc strukturně pórovitý, a tudíž z tahové zkoušky je patrné, že mechanické vlastnosti jsou oproti obráběnému výrobku horší a často nepoužitelné při plném zatížení. Na obr. 12 jsou znázorněny jednotlivé procentuální zastoupení laserových technologií v průmyslu. [1; 2; 3]



Obr. 12 Procentuální zastoupení laserové technologie v průmyslu [3].

Laserový paprsek svou dominancí vykazuje především ve vysoké přesnosti situovaného paprsku na velmi malou plochu, vyšší rychlostí a zejména v komplexnosti obráběného materiálu, které pro konvenční metody mohou být těžko obrobitelné. Laserový paprsek ovšem

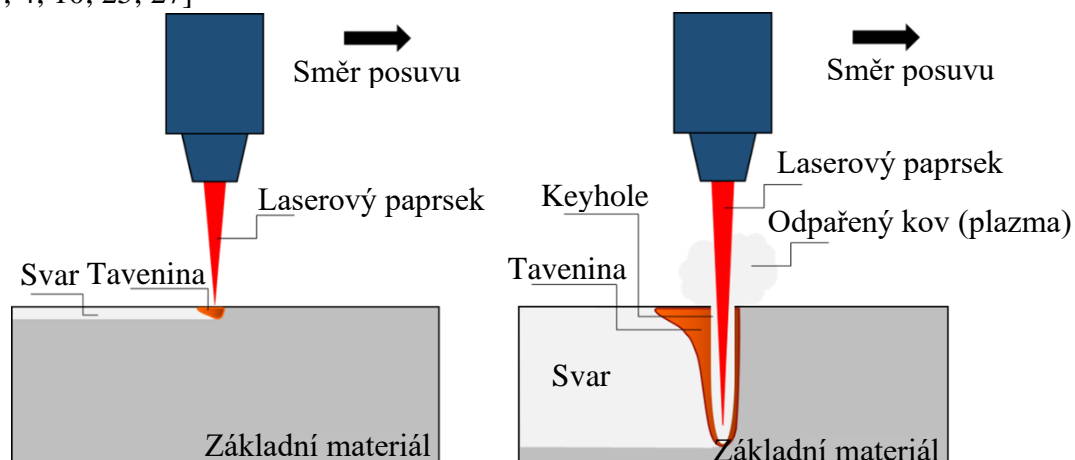
není schopen zpracovat veškerý materiál. Jak již bylo řečeno, problémové jsou pro laser odrazivé materiály a s tím spjatá jejich tepelná vodivost, kdy absorpce paprsku je minimální a může tak dojít ke zpětnému odrazu. Vhodnější je tedy pro tyto typy materiálu zvolit metodu buď konvenční (soustruh, frézku, vrtáčku apod.) nebo z nekonvenčních plazmu nebo vodní paprsek. [1; 2; 3]

2.3.1 Laserové svařování

Technologie laserového svařování, řídící se normou ČSN EN ISO 4063, patří v dnešní době k nejmodernějším a nejuniverzálnějším technologiím svařování s vysokou hustotou energie na dopadající plochu. Jedná se o tavnou metodu svařování, u které není potřebný přídavný materiál. Samotný paprsek je fokusován do ohniska optikou kolmo k materiálu, tak jako například u laserového řezání. Díky zaostření paprsku dochází k lepšímu a také zejména rychlejšímu lokálnímu ohřevu v důsledku vysoké výkonové hustoty záření dopadajícího na plochu postupně tavícího se materiálu. Získá se tak úzký svar bez nečistot, trhlin, pórů, studeného spoje nebo výrazného tepelného ovlivnění, které by způsobilo změnu mechanických vlastností v okolí svaru. Svar a jeho okolí bude pevnější, houževnatější, bez nároku dalšího opracování. Velký vliv na tuto technologii má, tak jako u jiných technologických metod, volba správné módové struktury. Volbou správného módu získáme dvě metody, metodu kondukční a penetrační neboli metodu keyhole. [1; 3; 4; 10; 25; 27; 28]

Metoda kondukčního svařování je charakteristická vytvořením svarové lázně s nedostatečným průvarem v průměru desetin milimetru z nižší zvolené výkonové hustoty na jednotku plochy, zhruba do $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Z hlediska kvality dochází ke zvětšení tepelného ovlivnění materiálu, mechanické vlastnosti jsou tedy horší. Metoda je ovšem rychlá, ekonomicky méně náročná a je zejména určena pro svařování tenkých neodrazivých materiálů. [1; 3; 4; 10; 25; 27]

Metoda penetrační, známá pod názvem keyhole (klíčová dírka) je metoda, u které je výkonová hustota pohybu velice vysoko a to nad $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Vysoká výkonová hustota zapříčiní intenzivní lokální ohřev, kdy vzniklé odpařování materiálu spolu s vysokým tlakem postupně vytlačuje roztavený materiál směrem ven. Vzniká kapilára, keyhole, která se posuvem a tlakem paprsku a povrchovým napětím roztaveného kovu postupně zaceluje. Aby tzv. klíčová dírka byla stabilní musí nastat energetická rovnováha, kdy přiváděná energie se musí rovnat energii odváděné do svařovaného materiálu. Finální svar je s nadměrně hlubokým průvarem a s minimální tepelně ovlivněnou oblastí, mechanické vlastnosti u metody keyhole jsou tedy lepší než u metody kondukční. Obě metody laserového svařování jsou zobrazené na obr. 13. [1; 3; 4; 10; 25; 27]



Obr. 13 Schéma laserového svařování metodou kondukční (vlevo) a metodou keyhole (vpravo) [17].

Parametry laserového svařování jsou závislé zejména na správném výběru rezonátoru. Nejvíce užívané rezonátory jsou CO_2 a pevnolátkové. Mezi další ovlivňující parametry

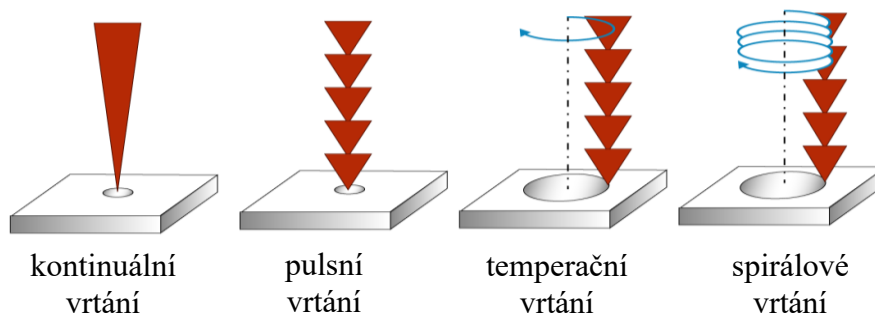
laserového svařování patří již zmíněná rychlost svařování nebo výkon laseru, jehož změna ovlivňuje hloubku, ale i šířku svaru. Platí, čím větší výkon, tím větší průvar. Technologie laserového svařování se díky vysoké rychlosti a teplotě ohřevu uplatňuje u hůře svařitelných materiálů s vysokou tepelnou vodivostí (měď – Cu, hliník – Al, ...) nebo u materiálů s vysokou teplotou tavení (wolfram – W, titan – Ti, molybden – Mo, ...). Svařované materiály se dají různě kombinovat, můžeme tak dostat homogenní materiálové spojení – spojení dvou stejných materiálů, nebo heterogenní spojení – spojení dvou odlišných materiálů. [1; 4; 10; 27]

Dnes je populární kombinovat laserový paprsek spolu s obloukovými metodami za účelem dosažení kvalitních svarů s co nejlepšími mechanickými vlastnostmi. Toto spojení je ve strojírenství nazýváno jako hybridní svařování. Nejčastěji kombinovanou metodou s laserem je metoda TIG – Tungsten Inert Gas, v češtině oblouková svařovací metoda s netavicí se wolframovou elektrodou v inertním plynu. Kvalitu svaru zajišťuje přídavný materiál, který se volí podle kritérií spojovaných materiálů. Ke zkoumání kvality svarových spojů slouží normou dané metody DT a NDT. Destruktivní zkoušení (DT) zkoumá svar dodanou energií, která vyvolá ve svaru destrukci. Mezi užívané DT metody patří zkoušky tahové, rázem v ohybu (Charpyho metoda), tvrdosti (Rockwell, Brinell, Vickers, ...) nebo zkoušky makroskopické/mikroskopické. Mezi nedestruktivní metody (NDT) patří metody, které nenamáhají svarový spoj. Patří mezi ně zkoušky vizuální, penetrační, magnetické, ultrazvukové nebo rentgenové. [27; 29]

2.3.2 Laserové vrtání

Vrtání za pomoci laserového paprsku je nejstarší laserová technologie, ale stejně jako ostatní laserové technologie patří k nejkompexnějším technologiím vůbec. Laserové vrtání je svým principem přirovnatelné k laserovému svařování keyhole. Jediný rozdíl je u laserového vrtání není využit posun paprsku. V důsledku vysoké výkonové hustoty paprsku působícího na materiál dochází k vytlačování materiálu směrem ven. [1; 4; 30]

Laserové vrtání se využívá zejména u těžkoobrobitelných materiálů, u kterých nelze dosáhnout vyvrtání děr pouhým nástrojem. Mezi nejčastěji užívané lasery patří rezonátory pevnolátkové Nd: YAG nebo vláknové, které díky své vlnové délce dokáží regulací parametrů zhotovit velikostně velice malé otvory. Vrtat lze tak materiály jako jsou například oceli, litiny, kompozity, keramiky nebo polymery. Stejně jako u ostatních laserových metod, tak i u laserového vrtání nastává potíž s odrazivými materiály. Proto se tyto typy materiálů nedoporučují obrábět, pouze s již zmíněnými pravidly. Na obr. 14 jsou zobrazené jednotlivé způsoby laserového vrtání. [1; 4; 30]



Obr. 14 Schémata způsobu laserového vrtání [30].

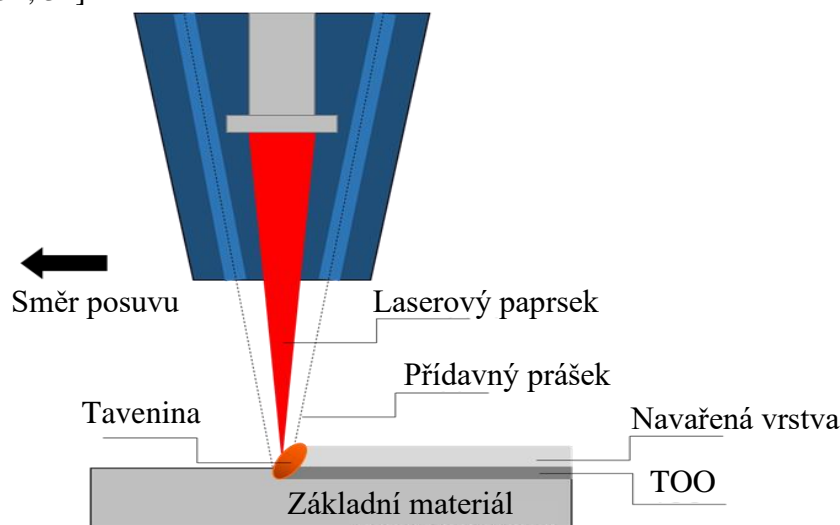
2.3.3 Laserové povrchové zpracování

S využitím laserového paprsku lze v dnešní době, díky jeho komplexnosti, nahradit řadu technologií, které dokáží materiál řezat, vrtat a zahlubovat, srážet hrany, lepit, nebo například měnit mechanické vlastnosti povrchu materiálu. Právě laserovým opracováním povrchu

lze měnit mechanické vlastnosti povrchu, které následně prodlouží materiálu životnost. Laserovým svazkem lze opracovávat různě zakřivené povrchy. Mezi tyto metody patří i značení a gravírování, která jsou odolné proti různým mechanickým opotřebením. [4; 10; 31; 32]

Mezi laserové povrchové zpracování patří například:

- Laserové navařování – technologie slouží k renovaci nebo vytvoření povrchové vrstvy i různě komplikovaných tvarů, např. k ochraně proti okolním vlivům (viz obr. 15). Výsledné povrchy mohou být tedy otěruvzdorné, korozivzdorné, žárupevné nebo žáruvzdorné s minimálním difúzním promísením se základním materiálem. Princip laserového navařování je stejný jako u svařování. Do lázně je přiváděn přídavný materiál, který obsahuje materiál a prvky ke zlepšení nebo renovaci daného povrchu. Do materiálu je přiváděno, oproti jiným metodám navařování, minimum tepla, a proto je výsledná struktura jemnozrnná. Velké vnesené teplo by způsobilo, jako u jiných metod, zhrubnutí zrna, které by následně vedlo ke zhoršení mechanických vlastností, popřípadě pnutí v materiálu. Přídavný materiál, nejčastěji ve formě prášku, je přiváděn do lázně dvěma způsoby a to bočním přívodem, nebo koaxiálně (tryskou) pomocí inertního plynu. Nejčastěji užívané materiály ve formě prášku s možnou tloušťkou návaru v rozmezí 50 až 1000 μm jsou na bázi železných a kobaltových slitin s přibližnou tvrdostí 60 HRC, niklových slitin s tvrdostí 64 HRC, karbidů wolframu a molybdenu s tvrdostí 1600 HV nebo karbidem titanu s tvrdostí až 3200 HV. Přídavný materiál může být i ve formě drátu. K laserovému navařování se využívají zejména CO_2 lasery. [1; 10; 31; 32]

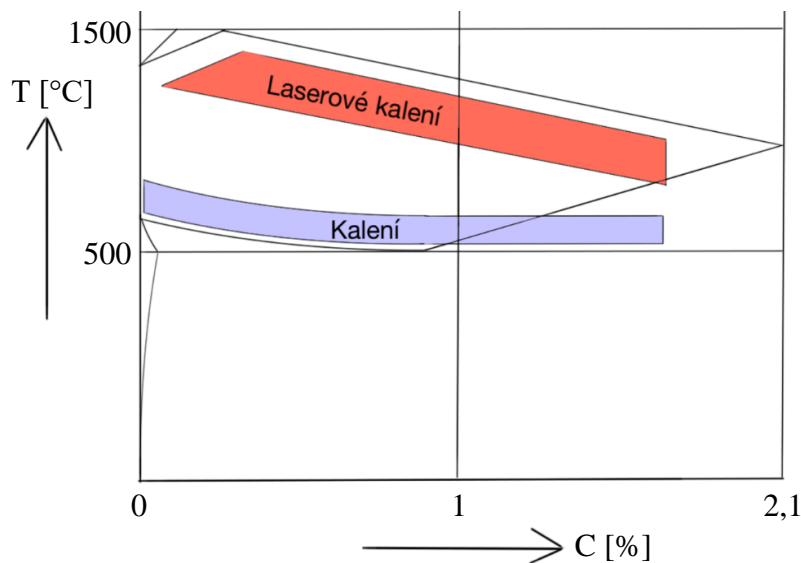


Obr. 15 Schéma laserového koaxiálního navařování [17].

- Laserové gravírování a značení – obě metody nahrazují dřívější způsoby značení a gravírování rytím, razníkem, tiskařskými stroji, elektrozivně, odleptáváním apod. Podstata obou metod je totožná. Pomocí laserového paprsku a koncentrované tepelné energie se nesmazatelně a viditelně popíše povrch materiálu. Díky skenovací hlavě je možné paprsek naklánět, což zapříčiní elektronicky nakláněná zrcadla. Princip obou metod je ovšem odlišný. Odlišnost u obou metod spočívá v působení laserového paprsku. U gravírování dochází vlivem tavení a odpařování pulzním paprskem k úběru vrstvy povrchu materiálu. Vzniklý trojrozměrný reliéf nazývaný jako gravula dosahuje hloubky až 50 μm . U laserového značení dochází k lokálnímu ohřevu povrchu, který intenzitou energie následně ztmavne. [1; 4; 10]
- Obě metody se dají zkombinovat s jinými laserovými stroji (řeznými, svařovacími, ...) a to převážně díky snížení výkonu a použití pulzního režimu. Gravírování a značení má před sebou velkou budoucnost. Díky pikosekundovému laseru, užívající tenkodiskový

laserový rezonátor generující záření na vlnové délce 1030 nm s ultrakrátkými pulzy trvající miliardtiny vteřin, dokáže materiál obrábět téměř za studena s okamžitým odpařením kovu po dopadu paprsku. Může díky tomu obrábět všechny kovy a různé druhy keramik a skel. Dominancí tohoto laseru je mikroobrábění – značení a gravírování malých komponent jako jsou například čipy. [33]

- Laserové kalení – cílem tepelného zpracování, kalení, je zvýšit tvrdost povrchu s podmínkou houževnatého jádra materiálu. Ke klasickému kalení, které se skládá z kalení martenzitického nebo bainitického, dochází ohřevem, závislým na obsahu uhlíku, na kalící teploty zhruba $30 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$ nad A_{c1} nebo A_{c3} . Z této teploty po výdrži dochází k ochlazení v médiu – voda, olej, vzduch. Jak velká proběhne rychlost ochlazení, taková výsledná struktura povrchu vznikne (rozpad austenitu na martenzit nebo bainit). Během ochlazení mohou nastat komplikace ve formě vnitřních pnutí. Mohly by tak vzniknout nežádoucí trhliny. K redukci vnitřních pnutí po kalení materiálu se volí popouštění, které materiál zrelaxuje. U laserového kalení dochází k rychlému ohřátí povrchu materiálu paprskem, kdy při následném posuvu paprsku se dané místo pomocí odvodu tepla do okolního materiálu ochladí tzv. samo zakalí, bez použití ochlazovacího média. Finální povrchová struktura o tloušťce až 2 mm je jemnozrná, tvrdá a bez pnutí v závislosti na houževnatém jádru. Laserové kalení je určené především pro součásti s větším objemem, aby odvod tepla z místa do materiálu byl dostatečný. Srovnání laserového kalení s tradičním způsobem je zobrazené na obr. 16. [1; 31; 34; 35]



Obr. 16 Srovnání laserového kalení s tradičním způsobem [34].

2.3.4 Laserové řezání

Dělení materiálu pomocí laserového paprsku patří k nejrozšířenějším nekonvenčním technologiím ve strojírenském průmyslu. Pomocí optiky a výkonu laseru je tato nekonvenční technologie schopna řezat materiály ve formě plechu nebo tvarových profilů kovové a nekovové s různou tloušťkou a především tvrdostí, jelikož při laserovém dělení záleží na optických a tepelných vlastnostech materiálu, s přesností kolem 0,1 mm. Na obr. 17 je zobrazeno dělení 20 mm materiálu S355J2 pomocí fibre laseru TRUMPF TruLaser 5030 fiber s funkcí CoolLine, kdy na povrch materiálu je vstřikovaná kapalina, která slouží k lepšímu odvodu tepla z materiálu a zaručí tak řezání skořepinových dílců s dobrou jakostní kvalitou. [4]

Po výstupu paprsku z rezonátoru je kvalita paprsku závislá především na optice, která jej formuje. Mezi optiku patří zrcadla (CO_2 laser) nebo optický kabel (fiber laser),

které slouží k odrazu paprsku a tvoří tak cestu paprsku ve stroji. Poslední, finální zrcadlo před vstupem do řezné hlavy u CO₂ laseru, nazývané jako pružné, je zrcadlo, které reguluje polohu ohniska v ose „z“ pomocí tlaku působící vody na zrcadlo. Veškerá zrcadla jsou chlazená vodou, aby nedošlo k jejich poškození. Výstupní částí pro laserový paprsek je pak řezná hlava, která fokusuje paprsek do ohniska pomocí čočky s antireflexním povlakem. Jedná se o povlak, který brání zpětnému odrazu a pohlcuje tak paprsek. Čočka zároveň slouží jako ochrana před okolní atmosférou a jako uzávěr přetlakového pásma řezného plynu. Fiber laser je vybaven krycím sklíčkem v řezné hlavě, které napomáhá k redukci zpětného odrazu při dělení odrazivých materiálů. [1; 4; 10; 36; 38]

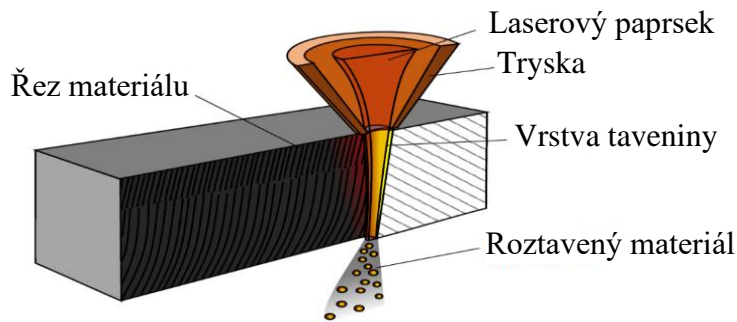


Obr. 17 Dělení materiálu pomocí fibre laseru TRUMPF TruLaser 5030 fiber [4].

Všechny části při průchodu nebo odrazu paprsku musí být dokonale čisté, jinak může dojít ke zhoršení jeho kvality. Paprsek je při výstupu z čočky obalen koaxiálně asistenčním aktivním nebo neaktivním plynem, který při řezání krom ochrany paprsku před okolní atmosférou slouží také jako pomocný nástroj při dělení materiálu. Při interakci paprsku s materiálem dochází k natavení materiálu v důsledku toho, že při dopadu paprsku na materiál se energie fotonů mění na teplo. Je třeba podotknout, že samotný paprsek žádnou teplotu nemá. Tavení je ovšem ovlivněno hustotou energie. Při nízké intenzitě je materiál schopen teplo odvádět z povrchu díky vlastní tepelné vodivosti. Pokud ale hustota energie vzroste na určitou kritickou mez, nastane přehřátí plochy a dochází tak k tavení a odpařování, při kterém se začne tvořit dutina. Cílem je, aby byl dosažen stav, u kterého bude zaručena délka dutiny totožná s tloušťkou děleného materiálu. Řeznou spáru vyplňuje roztavený kov, který se díky povrchovému napětí není schopen dostat ven z řezné spáry. K tomu slouží asistenční plyn, který proudí koaxiálně s laserovým paprskem a dostane tak dynamickým účinkem proudícího plynu roztavený kov ven z řezné spáry. Celý fyzikální princip řezného procesu a výsledné řezné spáry je založen na povrchovém napětí roztaveného kovu, dynamické síle proudícího plynu a smykovém tření mezi roztaveným kovem a asistenčním plynem. Povrch výsledné ztuhlé řezné spáry vykazuje vroubkování, které je způsobeno nerovnoměrným tuhnutím kovu, posuvem paprsku a proudu asistenčního plynu. Tloušťka ztuhlého kovu a tepelně ovlivněná oblast se pohybuje v desetinách milimetru, platí tedy, že tepelně ovlivněná oblast je téměř zanedbatelná. Spolu s posuvem vzniká finální řezná spára. Na obr. 18 je zobrazen princip laserového řezání, který vše názorně ukáže. [1; 4; 10; 36; 37; 38]

Tloušťka děleného materiálu je ovšem omezena a záleží především na typu materiálu. Pro větší tloušťky materiálu se využívá obecně širší spára, aby tok roztaveného materiálu z řezné spáry měl co nejlepší možné podmínky, proto platí, s narůstající tloušťkou roste šířka řezné spáry a přesnost spolu s jakostí klesá. Jak již bylo řečeno, pro laserové dělení větších tloušťek se využívají CO₂ rezonátory, které využívají módovou strukturu s širší intenzitou energie paprsku dopadajícího na plochu. Pevnolátkové rezonátory se svou vlnovou délkou a módovou

strukturou jsou určeny především k řezání menších tloušťek plechů do zhruba 3 mm. Výhodou je, že pevnolátkové lasery dokáží řezat tenké plechy až 6x rychleji, tím se zefektivňuje výroba. Problém ovšem nastává v kvalitě řezné hrany, kdy u pevnolátkového laseru je jakost horší v porovnání s CO₂ laserem. Další problém nastává v rychlosti, čím vyšší rychlost, tím větší stagnace stroje. Lépe řečeno, kvůli výrazně vyšší rychlosti u pevnolátkových laserů klesá strojní čas a tím narůstají prostoje spojené s vyložením a následným naložením materiálu. [1; 4; 10; 36; 37; 38]



Obr. 18 Schéma principu laserového řezání [37].

Řezný plyn je nedílnou součástí procesu laserového dělení, bez kterého by nevznikla řezná spára. Řezný plyn, jak již bylo řečeno, je veden do řezné hlavy, kde obaluje paprsek a chrání ho tak před okolní atmosférou. Řezný plyn také plní funkci ochrany čočky před znečištěním nebo poškozením při výstřiku roztaveného kovu z místa řezu. Plyny určené k řezání mohou být dvojího druhu a tím jsou aktivní plyny a neaktivní plyny. Oba tyto plyny jsou rozdílné a záleží jen na technologovi, která metoda bude ekonomičtější. [1; 4; 10; 36; 38]

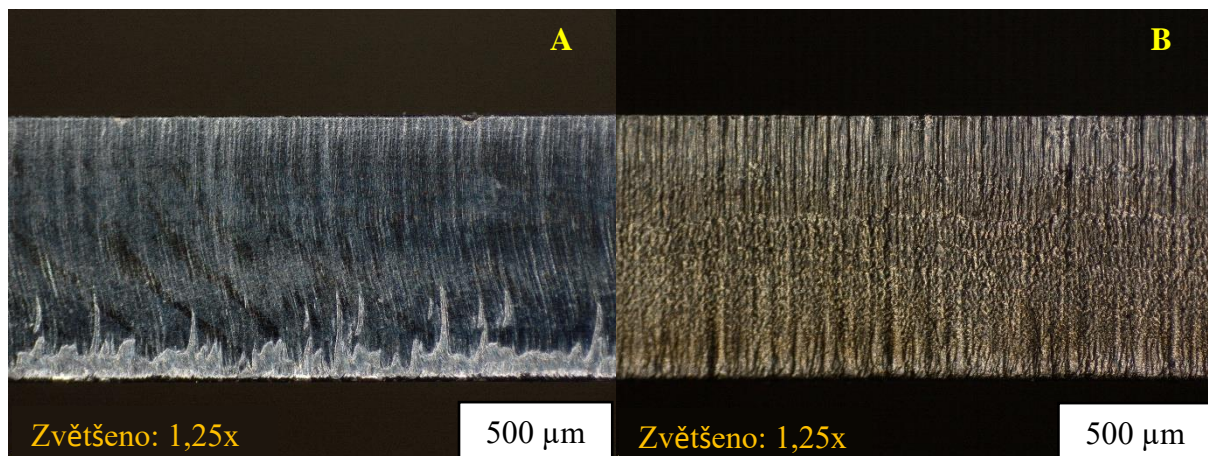
Podle druhu řezného plynu rozeznáváme tyto metody laserového dělení: [1; 10; 36]

- Oxidační způsob dělení materiálu – nebo také oxidační laserové řezání je způsob dělení materiálu, při kterém je jako pracovní plyn použitý kyslík (O₂). Základem oxidačního dělení je chemická reakce plynu s nataveným materiálem ve formě hoření, nazývaná jako exotermická reakce. Tato doplňková energie ve formě tepla napomáhá spálit materiál, díky tomu je možné řezat materiály s větší tloušťkou. Poloha ohniska, která je znázorněna na obr. 19, je umístěna v horní části materiálu. Díky tomu je umožněno držet rozumnou širokou řeznou spáru v závislosti na spalování roztaveného kovu. Nedochozí ani k podřezu materiálu, řezná hrana je v tomto případě částečně kolmá. Výhodou oxidačního řezání je nižší spotřeba plynu, než při užití dělení materiálu s inertním plynem, která je úzce spjatá s používanými tlaky plynu 3 ÷ 5 barů. Také řezná rychlost je u této metody daleko vyšší. Jakost řezné hrany má výborné výsledné hodnoty. Problém u této metody ovšem nastává ve svarové lázni, která pojí kyslík s železem. Vzniká tak oxid železnatý (FeO), který při vyfouknutí kovu ven z řezné spáry obaluje řeznou hranu. Obecně platí, že čistota plynu hraje významnou roli při laserovém dělení. Oxidační dělení materiálu se používá zejména pro dělení konstrukčních a hlubokotažných ocelí. Touto metodou lze dělit i materiály jako je například měď, která patří k odrazivým materiálům. Při interakci plynu kyslíku s mědí vzniká oxid měďnatý (CuO), který vytváří dostatečné podmínky k dělení mědi právě laserovou technologií.
- Tavné dělení materiálu – jedná se o metodu dělení materiálu, u které se využívá neaktivní řezný plyn se zaručenou čistotou ve formě dusíku (N₂) nebo inertní plyn argon (Ar). Jsou to plyny, které nepodléhají žádné chemické reakci při interakci s taveninou, tak jako u oxidačního způsobu. Laserový paprsek ohřívá materiál na teplotu tavení a následně je roztavený kov dynamickým působením proudu plynu vyfouknut ven z řezné spáry. Vzniká tak vysoce čistý lesklý řez bez okují. Ohnisko laserového paprsku je situováno na spodní části materiálu (obr. 19), díky tomu vzniká podřez,

který má za následek i širší řeznou spáru. Jelikož není u této metody užit neinertní plyn, který by zapříčinil vznik exotermické reakce, neboli přidaného tepla, je nutné výrazně zvýšit při dělení výkon, tlak plynu a s tím spjatý větší průměr trysky nebo například snížit rychlost posuvu paprsku. Tato metoda se užívá pro dělení legovaných ocelí, uhlíkových ocelí a barevných kovů. Výkon laseru zásadně ovlivňuje dělenou tloušťku materiálu v závislosti na druhu materiálu. Nevýhodou této metody je velká spotřeba řezného plynu, kdy při cenách neaktivních a inertních plynů je tato metoda u nízkolegovaných ocelí ekonomicky nevýhodná. Pokud je u těchto ocelí požadována další technologická operace ve formě povrchových úprav nebo například svařování, bude vhodné zvolit tuto metodu, jelikož u metody oxidační tvoří řeznou hranu okuje, které by způsobily komplikace. Proto z jistého hlediska odstranění okují by bylo finančně náročnější než použití tavné metody. Vizuální porovnání obou metod dělení je zobrazeno na obr. 20.



Obr. 19 Poloha ohniska u oxidační metody (vlevo) a tavné metody (vpravo) [32].



Obr. 20 Srovnání řezných hran metody oxidační (A) a tavné (B) [1].

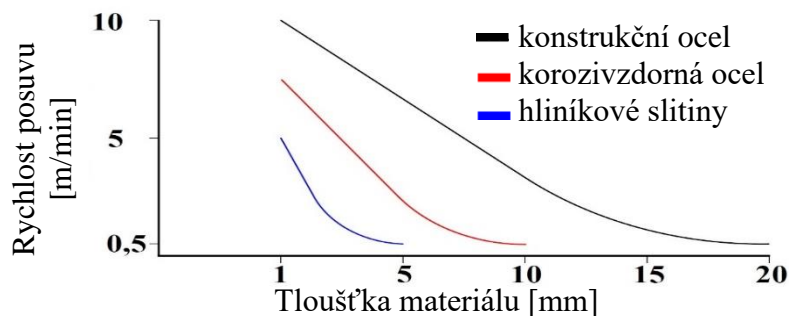
- Sublimační dělení materiálu – metoda, u které se uplatňuje, jak již z názvu plyne, sublimace kovu, tedy při interakci paprsku s materiálem dochází k odpařování roztaveného kovu. Řezné spáry po tomto ději nejsou obalené taveninou, tak jako u jiných metod. U sublimační metody se využívají neaktivní plyny dusíku (N_2), argonu (Ar) nebo hélia (He), aby nedocházelo k oxidaci řezných hran. Řezné plyny slouží v tomto případě vyfukování sublimačních výparů z řezné spáry a taktéž chrání čočku před potenciálním znečištěním či poškozením, tak jako u ostatních metod. Jelikož se jedná o metodu téměř totožnou s metodou tavnou, je nutné u této metody zajistit vyšší hustotu energie a s tím i spjatý vyšší výkon paprsku s pulzním režimem nebo nižší rychlost posuvu, aby došlo k sublimaci. Sublimační metoda dělení se používá zejména pro nekovové materiály, mezi které patří například plasty, kompozity, keramiky nebo dřevo. Lze řezat i kovové materiály, ovšem u nich je kladen důraz na to, aby laserový paprsek dopadal na materiál ve formě krátkých, časově oddělených pulzů.

Doba mezi pulzy musí být dostatečně dlouhá, aby se materiál stihl ochladit a nevznikla tak v místě řezu tavenina. Proto je výsledná řezná rychlost velice nízká. Dále platí, tloušťka materiálu nesmí být větší než průměr paprsku, mohly by vzniknout svary v důsledku kondenzace par.

Správným výběrem laserového rezonátoru a následnou regulací parametrů laserového dělení dosáhne řezná hrana co nejlepší kvality, i při řezání větších tlouštěk materiálu. V této části jsou shrnuty základní parametry, které vedou k dosažení co nejlepší možné kvality řezné hrany v závislosti na tloušťce a druhu materiálu. [1; 4; 5; 36]

Mezi nedůležitější základní parametry patří: [1; 10; 36]

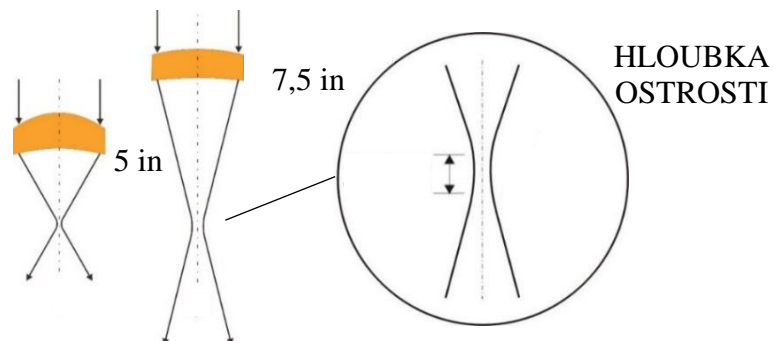
- Výkon laseru – představuje nejvýznamnější parametr z hlediska laserového dělení, který má zásadní vliv na kvalitu paprsku. Se správným nastavením laserového výkonu je paprsek schopen, s určitou kvalitou, se prořezat skrz materiál v závislosti na jeho tloušťce a druhu. U laseru a jiných zařízení platí, že účinnost je přímo úměrná poměru výkonu s příkonem. Aby se limitně účinnost stroje blížila k 100 %, je nutné zajistit, aby výstupní výkon byl co nejvíc ve shodě se vstupním příkonem. Kvůli tepelným ztrátám stroje nedosáhne účinnost stroje nikdy 100 %, tudíž platí, že hodnota výkonu bude nižší než hodnota příkonu. Výrobci se snaží s každým novým typem stroje snížit příkon a zamezit tak tepelným ztrátám. I z ekonomického hlediska jsou díky tomu novější typy strojů provozně výhodnější. Patří mezi ně například fiber lasery. U laserového dělení se využívají řezné plyny. Oxidační metoda dokáže v důsledku exotermické reakce výkon snížit až trojnásobně. U metody tavné a sublimační je nutné výkon zvýšit. Výkon samotného paprsku se odvíjí od samotného výkonu rezonátoru.
- Řezná rychlost – parametr, který určuje rychlost posuvu paprsku v závislosti na tloušťce a druhu materiálu, jehož změnou dojde k výrazné změně jakosti řezu. Parametr se dá upravovat tabulkově nebo stáhnutím potenciometru. Na obr. 21 je znázorněn graf, z kterého se dá zhruba vyčíst, jakou rychlostí je schopen řezat paprsek materiál o určité tloušťce a typu při zachování dobré jakosti.



Obr. 21 Grafické znázornění řezné rychlosti závislou na tloušťce materiálu [36].

- Druh a tlak řezného plynu – jedná se o parametry, které napomáhají vyfouknout materiál ven z řezné spáry. Jak již bylo řečeno, k řezání se využívají dva druhy plynů, aktivní a neaktivní. Neaktivní plyn slouží čistě k vyfouknutí roztaveného materiálu ven z řezné spáry. Jelikož se jedná o plyn, který nepodléhá při kontaktu s taveninou chemické reakci, je nutné, aby proud plynu měl dostatečný tlak k odfouknutí roztaveného materiálu, na úkor větší spotřeby plynu. Řezná hrana je ovšem čistá, kovově lesklá. U aktivních plynů dochází při kontaktu s taveninou k exotermické reakci, která napomáhá spálit roztavený kov, proto není potřeba mít tak vysoký tlak plynu jako u neaktivních plynů. Metoda je rychlá, s lepší jakostí řezné hrany. Nevýhodou je ale vrstva oxidů na řezné hraně. V tabulkových parametrech a řezacím listu se značí číslem nebo chemickou značkou.
- Kolmost a poloha ohniska – oproti jiným metodám vyniká technologie dělení materiálu laserem především ve vysoké přesnosti a kolmosti stěn vůči povrchu materiálu.

Podřez je minimální, jedná se pouze o desítky úhlových minut. Tento podřez především ovlivňuje umístění ohniska, které je fokusováno dovnitř materiálu. K zaostření laserového svazku do ohniska se používá čočka z křemenného skla s antireflexní ochranou selenidu zinečnatého (ZnSe), která slouží k pohlcení paprsku. Jeli povrch čočky znečištěn např. rozstříknutým roztaveným kovem, čočka se začne zahřívat, rozpínat a následně degradovat. Jakmile dojde k sebemenší změně tvaru, dojde i ke změně ohniska. Proto je i samotná čočka chlazená. Čočka se čistí v pravidelných cyklech, které se odvíjí od druhu děleného materiálu. Platí ovšem čím častější je čištění, tím dochází ke ztenčení ochranné antireflexní vrstvy. Dalším faktem je, že přirozeným stárnutím se čočka rovná a tím dochází ke změně ohniskové vzdálenosti. Charakter tvaru ohniska lze považovat za pseudoválec, jehož délka a průměr jsou závislé na optice a vlnové délce laserového svazku. Lze říct, že samotný paprsek je považován za Gaussovský svazek, jehož intenzita působení svazku na materiál klesá od jeho osy exponenciálně. Na obr. 22 je znázorněno schéma laserového paprsku. Při dělení je potřeba regulovat ohnisko tak, aby nejen bylo vnořeno dovnitř materiálu, ale aby i samotná ohnisková vzdálenost a hloubka ostrosti byly optimální. Ohnisková vzdálenost je regulována u CO₂ laserů pomocí pružného zrcadla, které je umístěno před vstupem paprsku do výstupní antireflexní čočky. Změny tvaru zrcadla a následná změna paprsku se docílí regulací tlaku vody působící na pružné zrcadlo. Posunutí ohniskové vzdálenosti lze provést také mechanicky na řezné hlavě, a to úpravou polohy antireflexní čočky. Samotná hloubka ostrosti je ovlivněna tvarem čočky. Fibre a CO₂ lasery mají jiné typy čoček, proto i tvar paprsku je odlišný. Nejčastěji využívané jsou 5 a 7,5 palcové čočky. Před samotným dělením je potřeba vycentrovat paprsek do středu trysky.

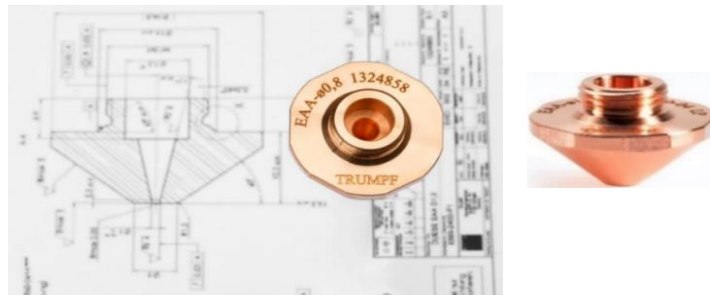


Obr. 22 Schéma laserového paprsku zaostřeného do ohniska [36].

- Režim řezání – při laserovém dělení se nejčastěji užívá dva typy režimu a to kontinuální, kdy výkon v závislosti na čase je konstantní, a pulzní, výkon v závislosti na čase se mění. Například kontinuální dělení se užívá na přímé dělení obrysů, pulzní na zápichy větších tloušťek plechů nebo vyřezávání menších otvorů, které jsou menší než samotná tloušťka materiálu.
- Zápich – lépe chápat jako startovací otvor. Při dělení obrysu dílce je nutné provést vpich mimo dílec skrz materiál, který plynule navazuje na obrys. Tento startovací zápich lze provést režimem kontinuálním nebo pulzním, jehož výběr úzce závisí především na tloušťce plechu nebo velikosti vnitřních a vnějších obrysů.
- Rampový cyklus – jedná se o parametr, který je nedílnou součástí parametru zapichování. Stroj udává graf (rampový cyklus) závislosti výkonu ve wattech na čase v milisekundách, kdy obsluha je schopna si jej sama korigovat. Rampový cyklus je definovaný jako parametr, který v závislosti na čase určuje průběh chování paprsku při zápichu. Lze jej tedy chápat tak, že při zápichu stroj může například lineárně, konstantně nebo jiným průběhem na čase zvyšovat či snižovat svůj výkon paprsku. Parametr je úzce spjatý s druhem děleného materiálu a s maximálním výkonem stroje.

- Vzdálenost mezi tryskou a materiálem – jedná se o vzdálenost mezi rovinou trysky s rovinou povrchu děleného materiálu. Díky kapacitnímu snímání vzdálenosti dokáže tryska kopírovat povrch materiálu. Její regulací se změni také poloha ohniska, které je důležitým prvkem při dělení materiálu. Čím menší je tato vzdálenost, tím bude větší pravděpodobnost poškození čočky rozstříknutým kovem.

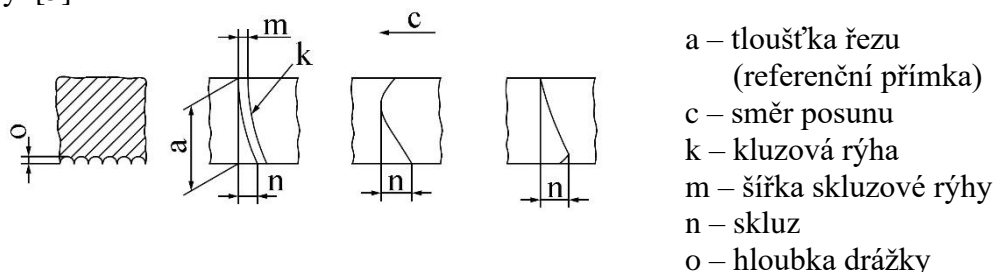
Výstupní částí laseru je tryska, která je ukotvena v keramickém kroužku. Tryska, která je zobrazena na obr. 23, s charakterem kruhového průřezu formuje asistenční plyn, který obaluje laserový svazek. Při poškození trysky dochází k výraznému zhoršení laserového dělení. Pokud se kov po vpichu nabalí zvenku na trysku, může také dojít ke změně výšky řezné hlavy, která se změni z důvodu kapacitního snímání vzdálenosti řezné trysky od děleného materiálu. Změni se také ohnisková vzdálenost, která řez velmi zhorší. Geometrie a materiál trysky je takový, aby zredukoval přichytávání rozstříklého roztaveného kovu na trysku nebo aby nedošlo ke kolizi trysky s obrobkem. Vyrábí se i různé povlakované trysky, které redukuje přichytávání kapek roztaveného kovu. Výběr vnitřního průměru trysky závisí především na druhu děleného materiálu v závislosti na druhu použitého asistenčního plynu.



Obr. 23 Schéma geometrie trysky [4].

2.4 Jiné metody tepelného dělení spadající do normy ČSN EN ISO 9013

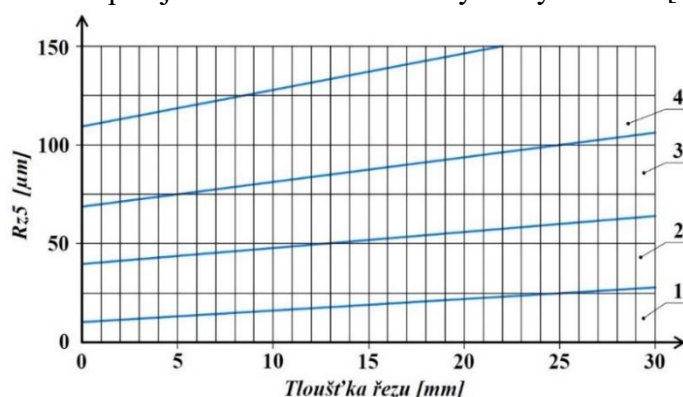
Laserové dělení spadá do normy ČSN EN ISO 9013, která popisuje klasifikaci tepelných řezů technologie laseru, plazmy a kyslíkového plamene. Norma představuje geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti povrchu řezů nebo technickou dokumentaci právě pro tepelné dělení. Norma je předepsána pro tloušťky řezu pro plamen od 3 mm do 300 mm, plazmu od 0,5 mm do 150 mm a pro laser od 0,5 mm do 32 mm. Mezi vyhodnocovanými parametry popisující právě tyto metody patří typy řezů – svislý nebo kolmý řez, rychlost řezání, skluz – n , úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu – u , průměrná výška prvků profilu – $Rz5$, natavení horní hrany, otřep a okuje nebo drážkování, které zahrnuje prohlubeniny a zářezy hloubky nepravidelných tvarů. Na obr. 24 je názorně zobrazen normou udávaný obrázek skluzové rýhy. [5]



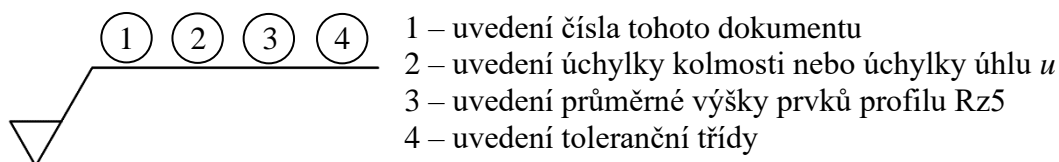
Obr. 24 Skluzová rýha [5].

V normě jsou dále specifikovány požadavky na měření, kdy samotná měřidla jsou rozdělena na měřidla pro přesné a hrubé měření. Měření musí probíhat na předem očištěných, okartáčovaných řezech bez oxidů a na místech mimo oblast, ve které se vyskytují vady v řezu. Počet a umístění měřících míst stanovuje sám výrobce a také platí, že měřící místa jsou vybíraná

podle tvaru, velikosti a předpokládaném použití. Pokud není tento počet blíže specifikován, provádí se u měření úchylky kolmosti nebo úchylky úhlu dva krát tři měření ve vzdálenosti 20 mm na metr řezu. Pro tloušťky menší než 2 mm se dle normy musí předem dohodnout postup měření. Norma dále rozděluje úchylku kolmosti nebo úhlovou úchylku do pěti tolerančních polí. U průměrné výšky prvků profilu, která se stanovuje z pěti za sebou naměřených největších výšek profilu Rz na základních délkách l_r , kdy je jedno měření prováděno na každý metr řezu v místě výskytu nejvyšší drsnosti. Dále platí, že u kyslíkového a plazmového dělení se měření provádí ve 2/3 řezu od horní řezné hrany. U laserového dělení měření probíhá v 1/3 od horní řezné hrany. Toto tvrzení platí pro tloušťky řezů větších než 2 mm. Pokud má materiál tloušťku menší než jsou 2 mm, pak platí, že měření je prováděno v 1/2 tloušťky řezu. Výsledné hodnoty z měření parametru průměrné výšky prvků profilu Rz5 se poté vynášejí do grafů závislosti průměrné výšky prvků profilu na tloušťce děleného materiálu, kdy tento graf je rozdělen do čtyř jakostních tříd. Na obr. 25 je zobrazený jeden ze dvou grafů, jenž udává norma. Norma dále blíže specifikuje údaje v technické dokumentaci, kdy na obr. 26 je zobrazené normou dané značení stupně jakosti a toleranční třídy na výkresech. [1; 5; 19]



Obr. 25 Graf závislosti Rz5 na tloušťce děleného materiálu z normy ČSN EN ISO 9013 [5].



Obr. 26 Vzorový příklad značení v technických dokumentacích dle normy ČSN EN ISO 9013 [5].

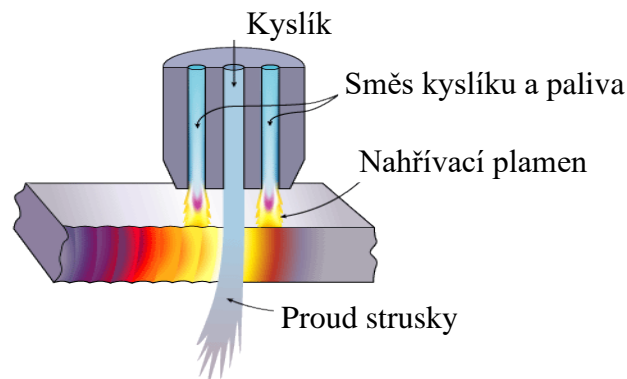
Jak již bylo řečeno, k dělení kovového a nekovového materiálu se nejčastěji využívají nekonvenční technologie. Krom laserového dělení se využívá také plazmové a kyslíkové dělení. Existují i jiné metody (viz tab. 3) jako je například dělení a svařování svazkem elektronů, které se využívá téměř výhradně k vědeckým účelům. Jedná se o technologii, kdy proud urychlených a zaostřených elektronů dopadá na materiál. Vlivem vysoké kinetické energie elektrony pronikají hluboko do materiálu. Po dopadu elektronů se materiál taví, sublimuje a vzniká válcová dutina, která je obalena roztaveným kovem. U této metody je při dělení a svařování nutné zajistit vakuum, jinak by došlo k rozptylu elektronového paprsku. Tato metoda je ovšem ekonomicky nevýhodná, proto se v průmyslu takřka nevyužívá. [39]

Tab. 3 Srovnání metod nekonvenčních technologiích z hlediska hustoty energie [36; 39].

METODA	HUSTOTA ENERGIE [$\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$]
Laserový paprsek	$10^7 \div 10^9$
Plamen	10^3
Plazma	10^6
Elektronový paprsek	$10^5 \div 10^9$

2.4.1 Metoda dělení kyslíkem

Podstata kyslíkového dělení spočívá v principu ohřátí kovu na zápalnou teplotu, kdy poté dochází ke spálení materiálu proudem plynného kyslíku (viz obr. 27). Zápalná teplota je závislá na obsahu uhlíku materiálu. U oceli je volena v rozmezí $1050 \div 1300 \text{ }^\circ\text{C}$, kdy musí být menší než teplota tavení materiálu. Jak již bylo řečeno u laserového oxidačního dělení, kyslík patří mezi aktivní plyny, které způsobují při kontaktu s kovem exotermickou reakci, vzniká tzv. doplňkové spalné teplo. Kyslík má také za příčinu tvorbu oxidů, které obalují řeznou plochu při vyfukování roztaveného kovu ven z řezné spáry. Dále platí, že teplota tavení oxidů musí být menší než teplota tavení kovu. Jako topný plyn se při dělení převážně volí acetylen s příměsí kyslíku, který zajišťuje rychlý a kvalitní ohřev materiálu. Dají se využít i jiné, levnější plyny jako jsou například vodík, zemní plyn nebo propan. Plyny se volí s maximální možnou čistotou k dosažení co největší produktivity a kvality dělení. [10; 40; 41]



Obr. 27 Schéma principu kyslíkového dělení [10].

Pro dělení se využívají nelegované a nízkolegované oceli s procentuálním obsahem uhlíku – C do 1,6 % a chromu – Cr do 5 %. Při vyšším procentuálním zastoupení se musí materiál přehřívát, popřípadě žíhat, jelikož může dojít k zakalení a popraskání hran řezu. Na dělení má také vliv chemické složení materiálu. Nelze ovšem kyslíkem dělit neželezné kovy spolu s litinou. Při dělení, ale také svařování, vzniká tepelně ovlivněná oblast, která zhoršuje pevnost, houževnatost a zvyšuje tvrdost materiálu. Tato oblast je způsobena nestejným ohříváním a ochlazováním kovu. Vysoce přehřátá oblast tepelně ovlivněné oblasti má také za následek zhrubnutí okolních zrn, které zapříčiní právě zmíněné zhoršené mechanické vlastnosti v okolí řezu. [10; 40; 41]

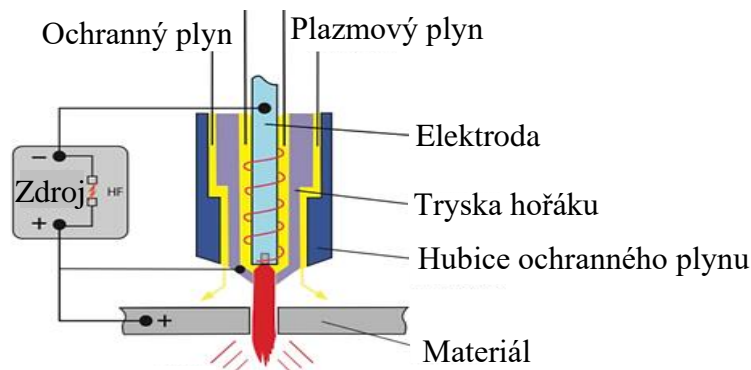
Při vhodně zvolených parametrech, jako jsou například rychlost řezání, tlak řezacího plynu nebo vzdálenost řezací hubice od povrchu řezaného plechu, je tato metoda schopna dělit materiály do tloušťky až 500 mm, dělená tloušťka je ovšem ovlivněná chemickým složením materiálu. Materiály o tloušťkách menších než 3 mm není vhodné dělit touto metodou především z důvodu propálení materiálu. V případě větších tloušťek materiálu až do 2000 mm se přidává do řezu čistý železný prášek. [5; 10]

2.4.2 Metoda plazmového dělení

Vznik plazmy spočívá v ionizaci plynu, tedy oddělení elektronů z valenčních sfér atomů, kdy plyn začíná být elektricky vodivý. Plazma je tedy ionizovaný plyn obsahující stejný počet nabitých částic iontů a elektronů, která se navenek tváří jako elektricky neutrální. Pokud se v plynu nachází dvouatomové plyny, musí nejprve nastat jev zvaný disociace, při kterém dochází k rozštěpení molekul na atomy. Poté nastane ionizace, která atomy rozštěpí na elektrony a ionty. [10; 40; 42]

Při plazmovém dělení dochází, tak jako u jiných metod tepelného dělení, k soustředění energie do místa, ve kterém dojde k lokálnímu ohřevu na teplotu tavení daného materiálu.

Díky dynamickému účinku proudícího plynu dojde k vyfouknutí taveniny ven z řezné spáry. Princip plazmového dělení spočívá v zapálení oblouku, nízkonapěťový vysokotlaký elektrický výboj v ionizovaném plynu, mezi wolframovou elektrodou (katoda) a kovovou hubicí (anoda). Toto je ovšem pilotní oblouk, který zajistí ionizaci prostoru mezi elektrodou a děleným materiálem. Tento proces vede k zapálení hlavního řezacího oblouku mezi elektrodou a materiálem. Díky rekombinaci je teplo i na spodu plazmového paprsku. Teplota plazmového dělení se pohybuje okolo 20 000 K. Schéma principu plazmového dělení je zobrazeno na obr. 28. [10; 40; 42]



Obr. 28 Schéma principu plazmového dělení [43].

Z důvodu vysoké výstupní teploty a vlastností plazmatu v závislosti na druhu plynu je možné dělit veškeré elektricky vodivé materiály. Další důležitou vlastností plazmy je i rychlost dělení, která jako u laseru je úzce spjatá s výkonem zdroje a je až 7x rychlejší než u kyslíkového dělení. Krom toho je rychlost také závislá na tloušťce a termo-fyzikálních vlastnostech děleného materiálu. Maximální možná tloušťka děleného materiálu je zhruba 250 mm, ovšem ve skutečnosti se plazma využívá tam, kde laserové dělení nestačí. Napětí na oblouku se volí kolem 100 ÷ 400 V, vyšší než u plazmového svařování, a proud v rozmezí 50 ÷ 1000 A, proto před samotným dělením je třeba připojit materiál na zdroj závislého oblouku, jinak hrozí roztavení wolframové elektrody. V tab. 4 jsou zobrazeny typy plazmatu, u kterých jsou znázorněny parametry a možnosti dělení. [10; 40; 42]

Hlavní výhodou plazmy je, na rozdíl od kyslíkového plamene, především vyšší rychlost dělení pro malé a střední tloušťky. Dále díky sníženému vnesenému teplu nevzniká tak velká tepelně ovlivněná oblast. Nevýhodou u plazmy je produkce ozónu a oxidů dusíku NO_x , které jsou pro člověka nebezpečné, dále pak zaoblený podřez po vstupu plazmového paprsku, a především je plazma hlučná. Plazmou lze dělit téměř všechny tavitelné, elektricky vodivé materiály. [5; 10; 40; 42]

Tab. 4 Srovnání typů plazmatu [42].

Typ plazmatu	Řezná rychlost	Kvalita řezu	Tloušťka [mm]	Dělené materiály
Vzduch	Vysoká	Průměrná	40	Konstrukční
Ar + H ₂	Nízká	Vysoká	20 ÷ 65	Legované
N ₂ + H ₂ O	Vysoká	Vysoká	100	Vysokolegované
O ₂	Vysoká	Vysoká	140	Konstrukční

2.5 Měření jakosti materiálu

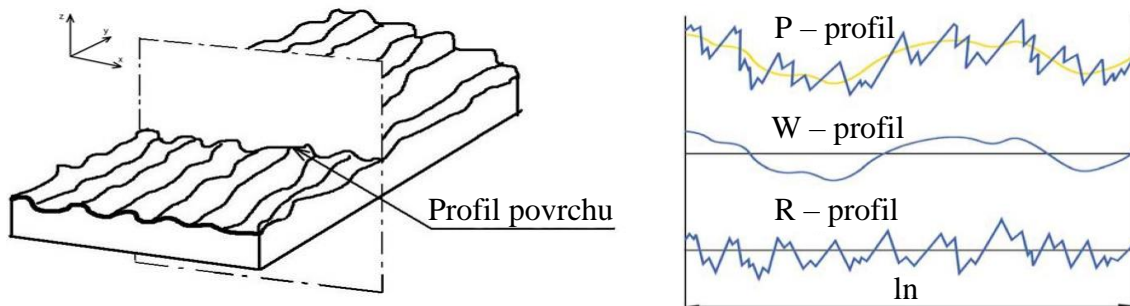
Jakost povrchu ve strojírenském průmyslu hraje nejvýznamnější roli z hlediska technologických operací ve formě obrábění, povrchových úprav, tepelného zpracování apod. Proto platí, čím lepší jakost povrchu materiálu, tím se snižuje potenciální problematika. Mezi činitele jakosti povrchu patří například tvrdost a s tím i spjatá tepelně ovlivněná oblast, nebo drsnost povrchu, ale také různé strukturní vady ve formě pórů nebo vměstků. [36; 44]

Při použití metod tepelného dělení spadající pod normu ČSN EN ISO 9013, laserové, plazmové a kyslíkové dělení, vznikají nepříznivé jevy na povrchu dělené součásti po interakci paprsku s materiálem. Tyto nepříznivé jevy se na povrchu projevují jako povrchová drsnost nebo tvrdost. Za vznik těchto jevů odpovídá především množství vneseného tepla a následné ochlazení, rychlost posuvu paprsku, druh a čistota řezného plynu nebo tloušťka a čistota daného materiálu. [5; 36; 44]

2.5.1 Povrchová drsnost

Jedná se o vlastnost spadající do skupiny nazývané se struktura povrchu. Struktura povrchu vyjadřuje opakované nebo náhodné úchytky tvořící třírozměrnou topografii povrchu. Tyto úchytky nejčastěji vznikají při interakci nástroje s materiálem například při konvenčním či nekonvenčním obrábění, kdy rezonující nástroj v interakci o určité tlakové síle s materiálem tvoří na povrchu jistou strukturu. Stanovení struktury povrchu popisuje norma ČSN EN ISO 21920, která byla užita i v této diplomové práci. [1; 44; 45]

Struktura povrchu se získá z roviny, která je kolmá na měřený povrch materiálu, jak je patrné z obr. 29. Profil povrchu, neboli profilová křivka je křivka, z které se poté vyhodnocují parametry struktury povrchu. Profil povrchu tvoří základní profil P, ze kterého se poté za použití filtru krátkovlnných a dlouhovlnných složek získají parametry W a R profilu. Nejčastěji vyhodnocujícím parametrem je parametr profilu drsnosti R. Na obr. 29 jsou zobrazené průběhy parametrů profilu. [1; 44; 45]



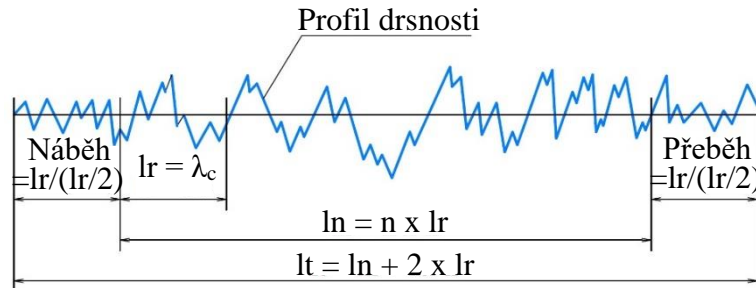
Obr. 29 Profil povrchu (vlevo) rozložený na struktury povrchu (vpravo) [45; 46].

Z měření drsnosti danou metodou se získá přibližný profil, který je obdobou profilu skutečného. Pro získání co nejlepších a nejkvalitnějších možných výsledných hodnot, je nutné stanovit dostatečně dlouhé měřené plochy. Celé schéma profilu drsnosti spolu s délkami je zobrazeno na obr. 30.

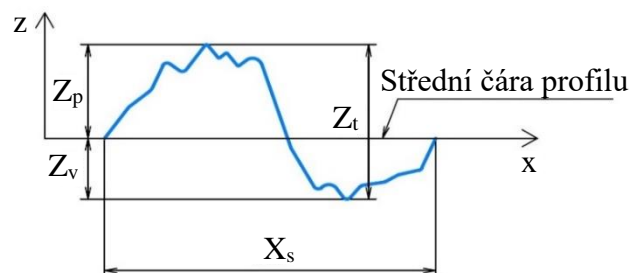
Pro vyhodnocení povrchu se využívají tyto délky: [1; 44; 45]

- Délka náběhu a přeběhu – jedná se o délky, které jsou vstupním parametrem při měření drsnosti, ovšem pro výsledné vyhodnocení jsou nepodstatné.
- Základní délka profilu drsnosti (l_r) – používá se pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil drsnosti ve směru osy x.
- Vyhodnocovaná délka profilu (l_n) – délka, která se využívá se k posouzení vyhodnocovaného profilu ve směru osy x, kdy se z této délky vyhodnocují požadované parametry. Její velikost je rovna n počtu (nejčastěji pěti) základních délek.
- Celková délka snímání (l_t) – délka, která je složená ze všech základních délek měřeného povrchu ve směru osy x a používá se pro správné změření na délce l_n .
- Prvek profilu – charakterizován největším výstupkem a prohlubní, jenž překračuje střední čáru profilu, jak plyne z obr. 31. Z tohoto obrázku jsou patrné následující parametry, ze kterých jsou poté vypočteny parametry drsnosti na vyhodnocované délce profilu.
 - Výška výstupku profilu (Z_p) – vzdálenost nejvyššího bodu výstupku od střední čáry profilu.

- Hloubka prohlubně profilu (Z_v) – vzdálenost nejnižšího bodu prohlubně od střední čáry profilu.
- Výška prvku profilu (Z_t) – součet výšky výstupku a hloubky prohlubně.
- Šířka prvku profilu (X_s) – vzdálenost na ose x, kdy čára profilu protíná střední čáru profilu.



Obr. 30 Profil drsnosti [44].



Obr. 31 Prvek profilu [44].

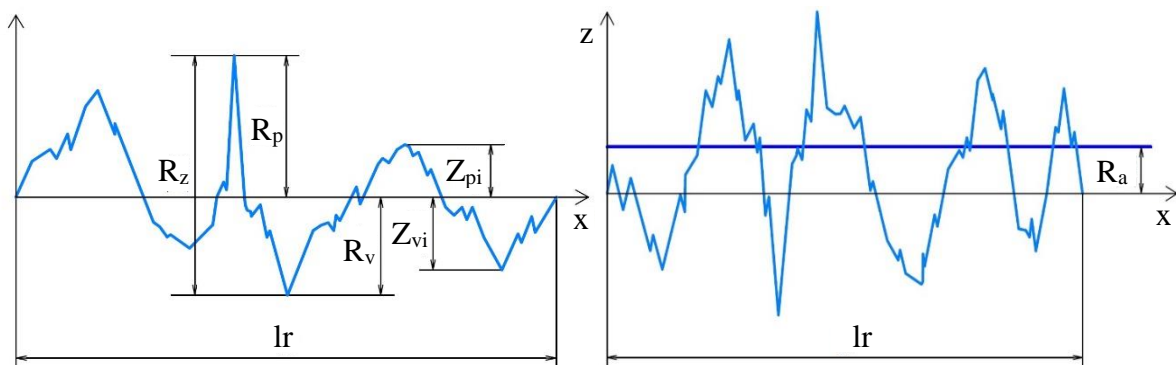
Povrchová drsnost je množina, která zahrnuje široké množství parametrů, které ji popisují. Mezi tyto parametry patří například: [1; 44; 45]

- Výškové parametry:
 - Největší výška profilu drsnosti (R_z) – hodnota získána součtem výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu R_p a hloubky Z_v s nejnižší prohlubní profilu R_v (viz obr. 32).

$$R_z = R_p + R_v = \max(Z_{p_i}) + \max(|Z_{v_i}|) [\mu\text{m}], \quad (2.1)$$

- Průměrná aritmetická úchylka měřeného profilu (R_a) – parametr získaný z aritmetického průměru absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ po integrační cestě v rozsahu základní délky profilu drsnosti lr . Tento parametr patří k nejvyužívanějším parametrům drsnosti v dnešním průmyslu (viz obr. 32).

$$R_a = \frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} |Z(x)| dx [\mu\text{m}], \quad (2.2)$$

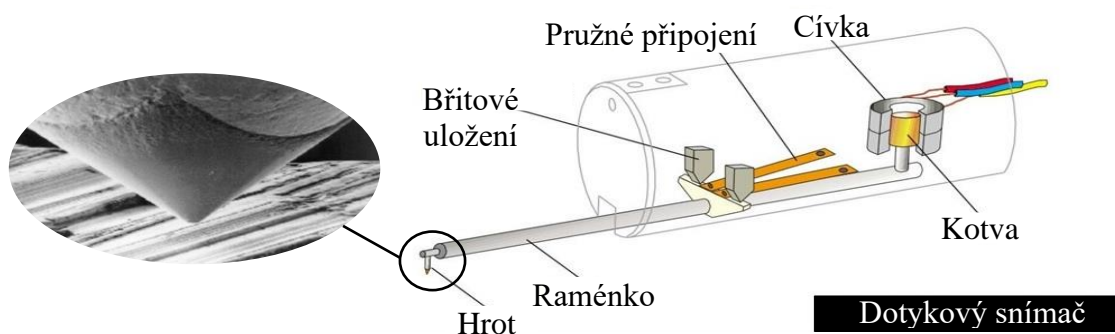

 Obr. 32 Největší výška profilu (R_z) (vlevo) a průměrná aritmetická úchylka (R_a) (vpravo) [44].

- Průměrná výška prvků profilu (R_c) – průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu drsnosti v rozsahu základní délky profilu drsnosti lr .

- Délkové parametry:
 - Průměrná šířka prvků profilu (R_{Sm}) – definován jako aritmetický průměr šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky l_r v podélném směru.

K měření povrchové drsnosti materiálu lze v dnešní době využít hned několik metod měření, kdy u každého typu je princip fungování založen na jiné bázi. Proto tyto metody měření povrchové drsnosti dělíme na: [1; 44; 47; 48]

- Kvalitativní měření povrchové drsnosti – pomalu upadající a nepřesná metoda, která je založena na bázi porovnávání, za pomoci lidských smyslů, drsnosti povrchu zkoumaného povrchu se vzorkovnicí.
- Kvantitativní měření povrchové drsnosti – nejužívanější metoda v oblasti měření drsnosti na bázi matematického popisu parametrů povrchu. Ke zjištění hodnot se využívají profilometry, nebo také drsnoměry, s kterými lze naměřit krom drsnosti i vlnitost či tvar daného povrchu. Kvantitativní měření se dále dělí na:
 - Dotykové měření – nejdokonalejší a nejvyužívanější metoda v oblasti měření drsnosti založena na principech dotyku snímacího diamantového hrotu s měřenou plochou povrchu materiálu. Princip spočívá v posuvu snímače ukotveného na rameni snímacího zařízení po povrchu měřené drsnosti. Tím se získají velice přesné informace o daném povrchu, které jsou ovlivněné zejména poloměrem zaoblení a vrcholovým úhlem snímače nebo velikostí působící přitlačné síly. Metoda užívá diamantový hrot k tomu, aby se při měření nezměnila otěrem geometrie snímače. Dotykové měření má tu výhodu, že při měření nezkrslují výsledky jisté nečistoty na povrchu materiálu (olejová vrstva, nečistoty apod.), jiné metody by mohly výsledky zkreslovat. Schéma dotykového profilometru je zobrazeno na obr. 33.



Obr. 33 Dotykový profilometr [44; 48]

- Bezdotykové měření – na rozdíl od dotykových metod, metody bezdotykové vyžadují dokonale čistý měřicí povrch. Princip je založený na vlnové délce viditelného světla, kdy paprsek je při průchodu regulován optikou na zkoumaný povrch, kdy se po dopadu paprsek odrazí. Část paprsku se odrazí zpět do přístroje, ze kterého se poté vyhodnotí, za pomoci spektrometru a jiných zřízení, výsledná struktura a část se odrazí mimo zařízení. Nečistoty by zkreslovaly výsledné hodnoty měření, a proto se tato zařízení využívají zejména ve vysoce čistých prostředích jako jsou například laboratoře.

2.5.2 Tvrdost materiálu

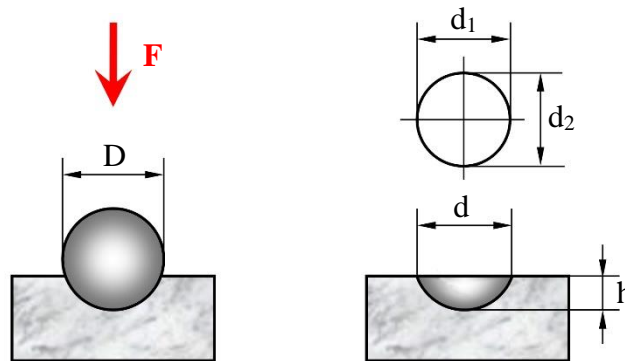
Tvrdost materiálu je definovaná jako mechanická vlastnost, kdy materiál klade odpor proti vnikání cizího tělesa neboli indentoru. Podstata měření tvrdosti je proto založena na principu kontaktu vtlačování nebo doteku indentoru do povrchu materiálu při předem definované síle za určitých definovaných podmínek. Tuto vlastnost materiálu lze vyhodnotit z typu deformace destruktivních (plastických) i nedestruktivních (elastických) zkoušek nebo charakteru zatěžující síly – statické nebo dynamické. Zkouška se také provádí pro zjištění

mikrotvrdosti nebo makrotvrdosti. Tvrdost lze měřit jak na kovových, tak i nekovových materiálech, jako je například plast, dřevo nebo sklo. [49; 50]

Metody se poté dělí do tří skupin: [49; 50]

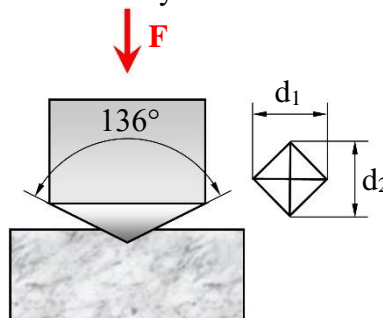
▪ Staticko-plastické:

- Brinell (HB) – zkouška, kterou udává norma ČSN EN ISO 6506 a je určena k měření makrotvrdosti, se provádí na tuhých rovinných vzorcích. Podstata zkoušky spočívá ve statickém vlačování indentoru ve formě kuličky z karbidu wolframu o předem normou daném průměru do povrchu zkušebního vzorku o určité síle. Po odlehčení se poté na povrchu změní dva na sebe kolmé průměry vtisku, které se poté aritmetickým průměrem a vzorcem zahrnujícím i sílu, vypočítá daná tvrdost materiálu. Platí, čím větší průměr vtisku, tím větší plocha vtisku, tím je možné získat více informací z materiálu. Zkoušku dle Brinella definuje norma, která v sobě například obsahuje dobu působení zatížení, teplotu zkoušky, měření vtisku, poměr průměrů, přípravu povrchu nebo zkoušku zkušebního tělesa. Zkouška je vhodná pro lité, heterogenní materiály, měkké slitiny nebo oceli. Schéma zkoušky tvrdosti dle Brinella je zobrazeno na obr. 34.



Obr. 34 Schéma zkoušky tvrdosti podle Brinella [50].

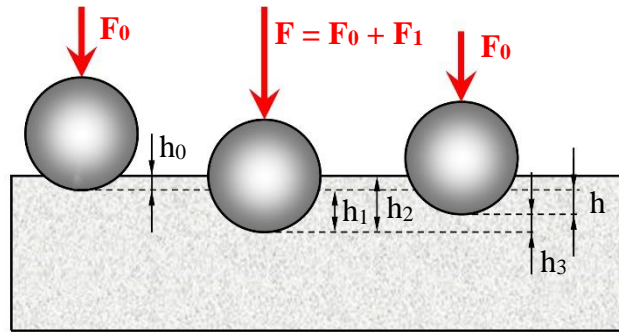
- Vickers (HV) – nejpřesnější metoda, která slouží ke zjištění mikrotvrdosti užívaná u metalografických výbrusů. Základem je malý vtisk indentoru – diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° , který je vlačován kolmo do povrchu zkušebního tělesa o určité zatěžující síle a době. Po odlehčení se změní na povrchu vzorku úhlopříčky vtisku. Výsledná tvrdost je poté poměr zatížení ku povrchu vtisku. Platí, čím menší vtisk indentoru, tím větší tvrdost. Zkouška je prováděná pro hladké i zakřivené plochy u velmi tvrdých homogenních materiálů, chemicko-tepelně zpracovaných materiálů s cementační nebo nitridickou vrstvou a pro materiály, které jsou zakalené. Zkoušku předepisuje norma ČSN EN ISO 6507. Schéma zkoušky tvrdosti dle Vickerse je zobrazeno na obr. 35.



Obr. 35 Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse [50].

- Rockwell (HRA, HRB, HRC, ...) – zkouška, která se provádí dle normy ČSN EN ISO 6508, je určena k měření makrotvrdosti, kdy indentor, ve formě

karbido-wolframové kuličky nebo diamantového kužele s vrcholovým úhlem 120° , je vtlačován do povrchu vzorku ve třech krocích. Napřed se indentor zatíží do určité hloubky h_0 silou F_I , hloubkoměr tvrdoměru se v této fázi vynuluje, poté se vzorek zatíží další silou F_{II} do hloubky $h_2 = (h_0 + h_1)$. Ve finále se přidavná síla F_{II} odtíží zpět na zatížení F_I , kdy se následně na tvrdoměru odečte finální tvrdost, která je dána trvalou hloubkou tvrdosti h . Zkouška podle Rockwella se využívá na hladkém rovném povrchu bez okují a mazadel nebo na konvexních válcových a kulových površích. Schéma zkoušky tvrdosti dle Rockwella je zobrazeno na obr. 36.



Obr. 36 Schéma zkoušky tvrdosti podle Rockwella [50].

- Knoop (HK) – jedná se o zkoušku, která je určena k měření mikrotvrdosti u daného vzorku. Indentor ve formě diamantu ve tvaru jehlanu s kosočtvercovou základnou s předepsanými úhly je vtlačován do povrchu zkoušeného materiálu. Poté se změří delší úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení indentoru a z té se vypočítá za přítomnosti síly výsledná tvrdost. Měřené plochy musí mít předem vyleštěný povrch, který se dle doporučení leští elektrolyticky. Metoda dle Knoopa je určena pro měření velmi tenkých vrstev a povlaků.
- Kleště Webstr – přenosné, méně přesné a snadno ovladatelné kleště s vestavěným indentorem a kontrolní pružinou. Metoda se využívá pro testování profilů hliníkových slitin, trubek a plechů do tloušťky 13 mm.
- Dynamicko-plastické:
 - Poldi kladívko (HB Poldi) – souprava tvořící přenosný tvrdoměr a porovnávací etalonovou tyčí o dané tvrdosti. Princip zkoušky spočívá v úderu kladiva do úderníku, což způsobí vtlačení kalené kuličky do měřeného vzorku a taktéž do etalonové tyče. Následně dochází k porovnávání rozměrů vtisku u vzorku a etalonové tyče na základě dané tvrdosti etalonové tyče za pomoci norem.
 - Baumannovo kladívko (HB Baumann) – přenosné zařízení, kdy podstata spočívá v odjištění pružiny, která uvolní kladívko, které udeří do ocelové kalené kuličky. To způsobí vtlačení kuličky do povrchu měřeného vzorku. Výsledná tvrdost se určí jako poměr zatížení a kolmému průmětu vtisku při určité síle.
 - Tvrdost dle Leeba (HL) – přenosný, méně přesný tvrdoměr, který je založen na dynamice (odrazu) kuličky ze slinutého karbidu nebo umělého diamantu. Metoda vychází z bezkontaktního měření rozdílu rychlosti vnikajícího indentoru před dopadem a po dopadu. Uvažuje také gravitaci, proto je nutný správný výběr orientace měření.
- Dynamicko-elastické:
 - Shoreho skleroskop (HSh) – nepřesná metoda, která je založena na odrazu vnikajícího indentoru do měřeného vzorku, kdy indentor je pouštěn z určité výšky. Po odrazu těleso vystoupá do určité výšky, z které je poté definována výsledná tvrdost. Metoda Shore se používá pro měření v horizontální poloze.

- Duroskop (HSh) – obdobná, poměrně nepřesná, metoda Shoreho skleroskopu, ovšem indentor je u této metody pouštěn z určitého úhlu. Výsledná tvrdost se určuje z naměřeného úhlu, do kterého těleso vystoupá. Metoda se využívá pro měření ve svislé poloze.
- Ultrazvuková metoda (UCI) – přenosná, méně přesná metoda, kdy vtisk indentoru, Vickersův diamantový hrot připojený na konec kovové tyčinky, je výrazně menší v porovnání s jinými metodami. Tyčinka je rozkmitána piezoelektrickými měniči, kdy změna frekvence je přímo úměrná hloubce vniku diamantu, a tudíž i tvrdosti materiálu. Změna frekvence také závisí na modulu pružnosti materiálu, proto pro různé materiály musí být přístroj předem kalibrován. UCI metoda se využívá na místech, které jsou jinými metodami těžko dostupné – lopatky, turbíny, ozubená kola apod.

2.6 Vysokopevnostní oceli

Vysokopevnostní oceli jsou oceli, které vykazují zvýšenou pevnost oproti konvenčním ocelím, a proto jsou momentálně nejčastěji užívanými ocelmi na karosériích v automobilu. Jak je ukázáno na obr. 37, vysokopevnostní oceli se dále dělí do několika skupin, kdy jednotlivé skupiny vykazují jiné vlastnosti. Při laserovém dělení se tyto oceli chovají stejně jako klasické konvenční konstrukční oceli, proto řezné parametry jsou totožné. [51]

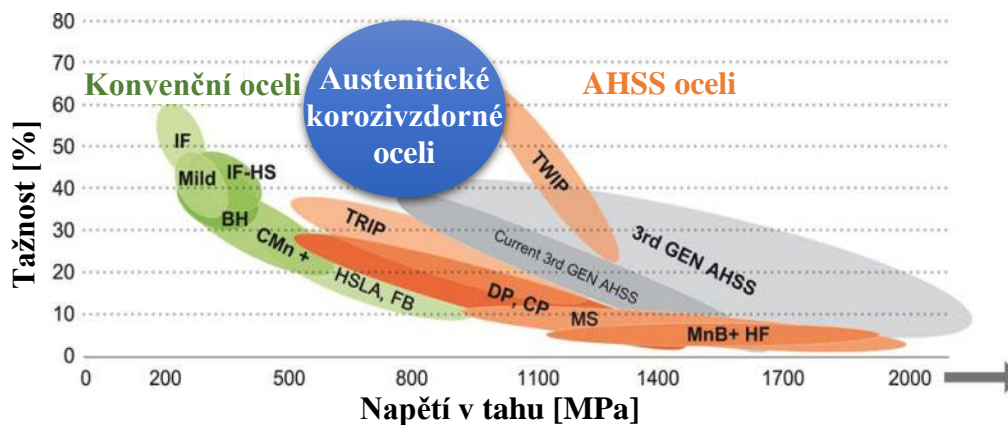
Mezi vysokopevnostní oceli se zvýšenou pevností patří: [51; 52]

- IF oceli (Interstitial – Free) – oceli, které nemají intersticiální prvky, mají zvýšenou pevnost a je u nich dosahována velice dobrý poměr tažnosti vzhledem k pevnosti. V oceli se nachází určité legury, jako je titan – Ti nebo Niob – Nb, které způsobují vznik karbonitridů a tudíž se potlačují vznik stárnutí materiálu a tedy docílí výrazného zlepšení plastických vlastností ocelí. IF oceli se využívají pro složité díly, které jsou vyráběné hlubokým tažením.
- BH oceli (Bake Hardening) – oceli s dodatečným vytvrzením po tepelném působení v okolí teploty 170 °C. Proces se využívá v automobilu, kdy daný efekt je spojen s nalakováním karosérie a následným vypalováním laku při dané teplotě po dobu 20 minut při dosažení procesu umělého stárnutí a dodatečného zvýšení pevnosti s mezí kluzu do zhruba 500 MPa.
- HSLA oceli (High Strength Low Alloy Steels) – významné a cenově srovnatelné s cenami základních uhlíkových ocelí patří vysoce pevné mikrolegované HSLA oceli. U běžných nízkouhlíkových ocelí pro tvářeni za studena lze zpevnění dosáhnout maximálně intersticiálními nebo substitučními atomy a danou velikostí zrna. U HSLA ocelí je základní ocel C – Mn s obsahem manganu do 2 % v závislosti na požadované tvářitelnosti a svařitelnosti. Dále jsou zde přidány prvky jako jsou např. chrom – Cr, nikl – Ni, molybden – Mo, měď – Cu, dusík – N, vanad – V, niob – Nb, titan – Ti, zirkon – Zr v celkovém obsahu do 0,15 %. Tyto mikrolegující prvky jsou vázány na uhlík – C a dusík – N, kdy vytvoří precipitáty karbidů, nitridů nebo karbonitridů a dojde tak k nárstu pevnostních charakteristik materiálu. Malý procentuální obsah uhlíku a legujících prvků má pozitivní dopad na svařitelnost a výrazně neovlivňuje zpracování oceli. Zjemněním zrna při řízeném válcování za austenitizační teplotě u HSLA ocelí zajistí vyšší houževnatost, zvýšená mez kluzu nebo zvýšená tažnost. S mezí kluzu do zhruba 500 MPa mají HSLA oceli feriticko-perlitickou strukturu. S rostoucí mezí kluzu nad 500 MPa poté roste podíl bainitu v oceli.
- AHSS oceli (Advanced High Strength Steels) – oceli s vyšší mezí kluzu, než jsou HSLA oceli, se nazývají pokročilé vysokopevnostní oceli – AHSS. Jsou to oceli, které na rozdíl od klasických ocelí, které jsou jednofázové (většinou feritická mikrostruktura zpevněná tuhým roztokem, precipitáty nebo zjemněním zrna),

jsou vícefázové. To znamená, že tyto oceli jsou zpevněné fázovou transformací, jenž obsahují ferit, bainit, martenzit nebo zbytkový martenzit v takovém procentuální obsahu, aby bylo dosaženo daných mechanických vlastností oceli.

Mezi AHSS oceli patří například:

- FB oceli (Feriticko – Bainitické) – strukturu tohoto materiálu tvoří ferit a bainit, kdy vyšší pevnostní charakteristiky oceli se dosahují zjemněním zrna a zpevněním bainitu, přičemž zpevnění je způsobené vysokou hustotou dislokací a precipitací mikrolegujících prvků. Mez kluzu této oceli se pohybuje v rozmezí 330 ÷ 450 MPa a mez pevnosti 450 ÷ 600 MPa. V porovnání s HSLA oceli vykazují FB oceli vyšší deformační zpevnění a rovnoměrné prodloužení.
- DP oceli (Dual Phase) – strukturu tvoří feritická matrice a 5 ÷ 20% martenzit, a to tedy zaručuje houževnatost, tvrdost a pevnost. Mez kluzu se u této oceli pohybuje v rozmezí 300 ÷ 700 MPa a mez pevnosti 500 ÷ 1000 MPa s vysokým deformačním zpevněním.
- TRIP oceli (Transformation Induced Plastic Steels) – daná struktura je tvořena feritickou matricí a zbytkovým austenitem, která díky TRIP efektu dokáže v průběhu deformace transformovat na martenzit. Ze všech AHSS ocelí jsou TRIP oceli nejvíce houževnaté, kdy tažnost se pohybuje v rozmezí 20 ÷ 30 %, mez kluzu nad 380 MPa a mez pevnosti 600-800 MPa.
- CP oceli (Complex Phase Steels) – základní kameny tvořící strukturu CP oceli jsou martenzit, zbytkový austenit a perlit ve feriticko – bainitické matrici. Díky vysoce zjemněnému zrně oceli, které je způsobené zbržděnou rekrytalizací nebo precipitací mikrolegujících prvků a také díky BH efektu dosahuje daná ocel meze kluzu až 1000 MPa a meze pevnosti 1200 MPa.
- Maraging oceli (Martenzite and Aging) – nejpevnější oceli na trhu s mezí pevnosti v rozmezí 2000 ÷ 2700 MPa. Jedná se o martenzitickou strukturu s malým podílem feritu a bainitu, kde i díky stárnutí se vytvrzením matrice precipitáty dosahuje vysokých mechanických vlastností dané oceli. Ocel je díky martenzitické struktuře popouštěna pro zvýšení houževnatosti.

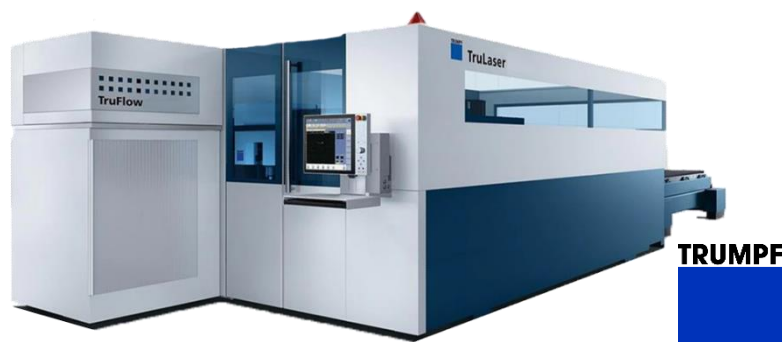


Obr. 37 Rozřazení vysokopevnostních ocelí do grafu tažnosti v závislosti na napětí v tahu [51].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části této diplomové práce, jak již z názvu vyplývá, je zhodnotit řezy u vysokopevnostního materiálu IMEX 700 tloušťky 10 mm metodami CO₂ a fiber laserového, plazmového a kyslíkového způsobu dělení. Tyto metody tepelného dělení definuje norma ČSN EN ISO 9013, která obsahuje požadavky na měřidla (hrubá nebo přesná), zhodnocení kvality řezu podle parametru průměrné výšky prvků profilu Rz5, úchytky kolmosti, úhlové úchytky, rozměrové úchytky nebo způsob technické dokumentace. U vzorků z každé metody tepelného dělení byla experimentálně zjištěna výsledná drsnost řezné hrany za pomoci kontaktního profilometru, šířka tepelně ovlivněné oblasti a výsledná tvrdost. Výsledky měření byly poté vyhodnoceny a porovnány. [5]

Celý experiment byl rozdělen do čtyř částí. První část probíhala ve firmě LASERCORE s.r.o. sídlící ve Vyškově, která poskytla k experimentu CNC řízený, portálový CO₂ laser TruLaser 3040 s 4 kW rezonátorem TruFlow 4000, jehož výrobcem je německá firma TRUMPF (viz obr. 38). Na tomto laseru se vyřezalo celkem dvanáct vzorků, s rozměrem vzorku 100 x 30 mm (viz obr. 40). U těchto vzorků se měřil čas řezání, včetně doby vpichu, a zapsaly se nastavené parametry laseru. Počet dvanácti kusů byl zvolen z toho důvodu, že první kusy jsou všeobecně jakostně horší z důvodu neustáleného řezacího procesu, jelikož každá část stroje pracuje při určitých teplotách (čočka, pružná zrcadla apod.) nebo může se stát, že tryska uplá na laserové řezací hlavě může být zpočátku znečištěna. Další důvod volby tohoto počtu byl ten, že se následně zkoumala spotřeba řezného plynu, která je znázorněna níže. [4]



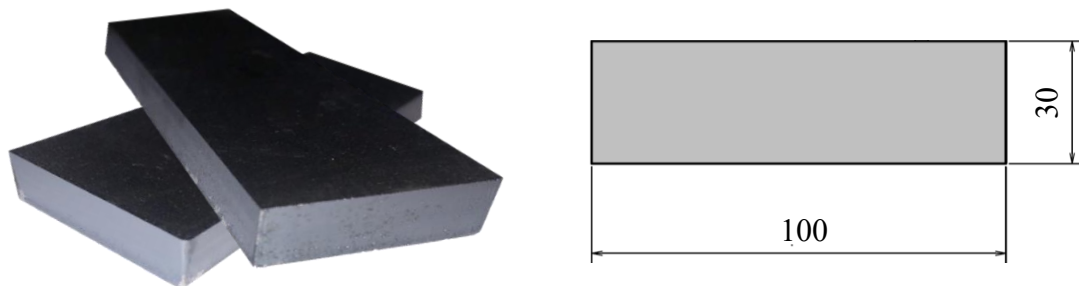
Obr. 38 Schéma laseru TRUMPF TruLaser 3040 s rezonátorem TruFlow 4000 [4].

Další část probíhala na pražské pobočce firmy TRUMPF. Firma disponuje portálovým CNC řízeným laserem TRUMPF TruLaser 3030 fiber se 6 kW diskovým rezonátorem TruDisk 6001 (viz obr. 39). Na tomto laseru bylo vyřezáno taktéž dvanáct vzorků, stejně jako u CO₂ laseru se zde měřil celkový čas řezání, včetně doby vpichu, s následným zápisem řezných parametrů. U obou laserů se využil oxidační způsob dělení, za pomoci asistenčního plynu ve formě kyslíku. V příloze 2 a 3 jsou zobrazené řezací lístky pro oba stroje vytvořené v CAM softwaru TruTops Boost, ve kterém se vytvořil program pro oba stroje. [4]



Obr. 39 Schéma laseru TRUMPF TruLaser 3030 fiber s rezonátorem TruDisk 6001 [4].

V příloze 4 jsou zobrazené technické údaje obou použitých strojů, v tab. 5 pak užité řezné parametry. Za povšimnutí stojí rozdíly v hodnotách vlnové délky, při které lasery pracují. Pevnolátkové lasery pracují s nižšími vlnovými délkami, než umí lidské oko zdravě zpracovat, proto jsou tyto lasery vybaveny UV filtry na sklech stroje. Velký rozdíl obou laserů je krom výkonu, v průměrném příkonu, kdy fiber laser má výrazně nižší příkon než CO₂ laser. Mimo jiné je fibre laser schopen díky své vlnové délce dělit i odrazivé materiály jako je například měď nebo mosaz a to do tloušťky 10 mm. Tato schopnost stroje je i díky krycímu sklíčku, které u CO₂ laserů chybí, došlo by totiž k poškození rezonátoru. [4]

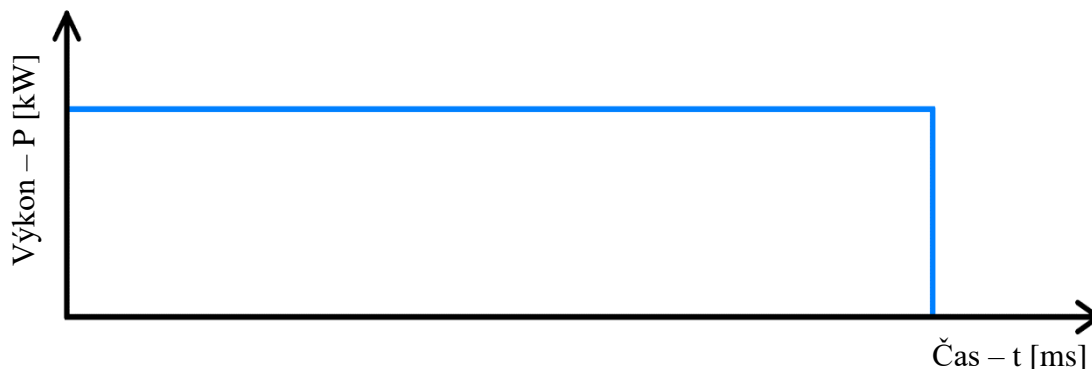


Obr. 40 Schéma dělených vzorků laserovou technikou.

Tab. 5 Tabulka užitých řezných parametrů u laserového dělení s celkovými časy [4].

	CO ₂ laser	Fibre laser
OBEČNÉ PARAMETRY		
Průměr trysky [mm]	1,2	1,2
Čočka [mm]	250	200
ŘEZÁNÍ – VELKÝ OBRYS		
Druh plynu	kyslík – O ₂	kyslík – O ₂
Hodnota nastavení FocusLine [mm]	2,5	-0,5
Výkon laseru [W]	3600	6000
Spínací frekvence [Hz]	20000	20000
Rychlost [m/min]	2	2,38
Vzdálenost trysky [mm]	1,5	1
Tlak plynu [bar]	0,6	0,7
Řezná mezera [mm]	0,42	0,86
ZAPICHOVÁNÍ NORMÁLNĚ PierceLine		
Druh plynu	kyslík – O ₂	kyslík – O ₂
Hodnota nastavení FocusLine [mm]	-13	-5
Doba za pichování [s]	0,5	0,7
Vzdálenost trysky [mm]	6	9
Tlak plynu [bar]	0,7	2,5
Celkový čas řezání [s]	128,9	98,1

U obou metod laserového dělení je třeba zmínit i druh zvoleného rampového cyklu při zápichu. Tento parametr vyjadřuje závislost užitého výkonu při zápichu v závislosti na čase. U fiber i CO₂ laseru byl použit konstantní výkon při časovém nárůstu se strmým spádem. U obou metod dělení je nastavený maximální možný výkon stroje, u CO₂ laseru 4 kW a u fiber laseru 6 kW, s časem, který je potřebný k propálení paprsku daným materiálem. Schéma užitého rampového cyklu je zobrazeno na obr. 41. [4]



Obr. 41 Schéma rampového cyklu použitý u CO₂ a fiber laseru [4].

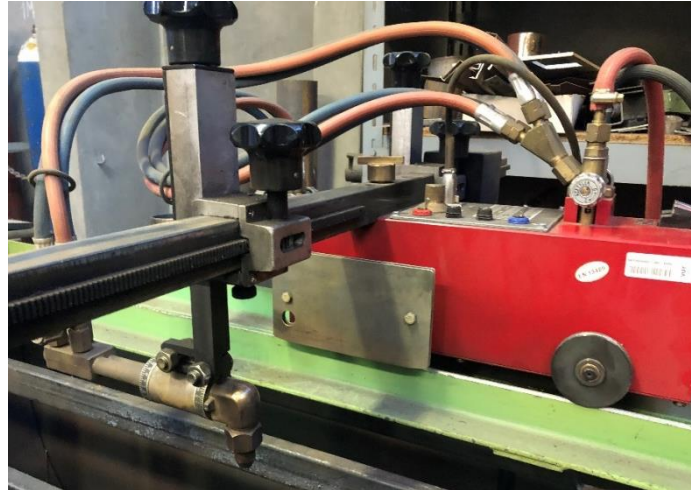
Třetí a čtvrtá část se odehrávala v dílenských prostorách na půdě Fakulty strojního inženýrství v Brně. Ke srovnání s laserovým dělením byla použita vzduchová plazma se zdrojem ESAB LPH 50 a kyslíkový hořák, který čerpá oba plyny z tlakových lahvích. Plazma a kyslíkový hořák, jak je patrné z obr. 42 a 43, jsou upnuty na mechanizovaném posuvném jezdcí kolmo k materiálu. Na obou zařízeních se do zbylého materiálu provedly řezy a užité parametry obou metod byly zaznamenány do tab. 6. Ve čtvrté části se poté u všech vyřezaných vzorků změřila drsnost, mikrotvrdość pomocí staticko-plastické metody dle Vickerse a tepelně ovlivněná oblast, respektive změření její velikosti a posouzení makro a mikrostruktury. Tato měření jsou rozpracována v dalších podkapitolách.

Tab. 6 Tabulka užitých řezných parametrů u plazmového a kyslíkového dělení.

Metoda dělení	Druh plynu	Rychlost [m/min]	Tlak plynu [bar]		U [V]	I [A]
Plazma	Vzduch	0,2	7,5		40	50
Kyslík	O ₂ a C ₂ H ₂	0,7	O ₂ = 5	C ₂ H ₂ = 0,5	-	-



Obr. 42 Vzduchová plazma se zdrojem ESAB LPH 50 využitá při experimentu [53].



Obr. 43 Kyslíkový hořák využitý při experimentu.

3.1 Měření hodnot parametrů drsnosti

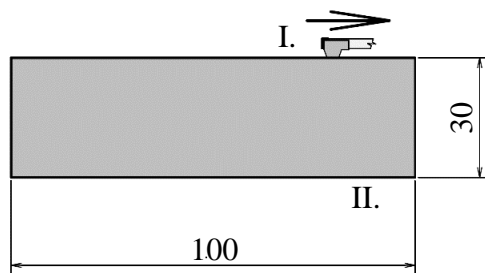
Ke změření parametrů drsnosti řezných hran u vzorků se použila dotyková metoda měření drsnosti přístrojem Handysurf+ 35, který je zobrazen na obr. 44, jehož výrobcem je firma Accretech. Přístroj disponuje diamantovým měřicím hrotem na pohyblivém rameni, pohybem ramene při nastavené vyhodnocované délce l_n , zaznamenává diamantový hrot danou drsnost povrchu řezné hrany. Výsledné hodnoty se následně zaznamenávají a převádějí do textového souboru, který pak lze převést do excelu s následným vynesemím hodnot do grafu. Kalibrační certifikát užitého zařízení je zobrazen v příloze 5. Dle normy ČSN EN ISO 9013 spadá toto zařízení do měřidel pro přesné měření. [54]



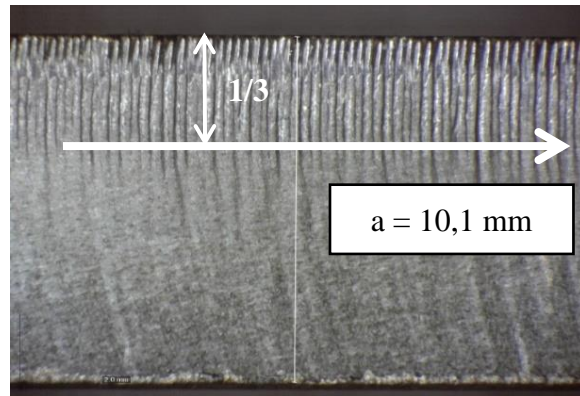
Obr. 44 Schéma drsnoměru Handysurf+ 35 [54].

Měření drsnosti řezných hran se provádělo na půdě Fakulty strojního inženýrství v Brně u pana doktora Řiháčka. U vzorků materiálu vysokopevnostní oceli IMEX 700 s tloušťkou 10 mm velikosti 100 x 30 mm vyřezané CO_2 a fibre laserem, plazmou a kyslíkem se provedlo měření. Jak již bylo řečeno, k následujícím měřením se vyřezalo 12 kusů vzorků na CO_2 laseru a 12 kusů vzorků na fibre laseru. K následujícímu měření se vzal vždy pouze první a poslední vzorek, tedy první a dvanáctý kus. U těchto kusů byly změřeny, tak jak je znázorněno na obr. 45 a obr. 46, zhruba 10 mm od krajního rohu řezu a 1/3 od horního okraje řezné hrany u laserového dělení a 2/3 u plazmového a kyslíkového dělení při zvolené měřené vyhodnocované délce $l_n = 12,5$ mm bez zahrnutého náběhu a přeběhu měření. Přístroj zaznamenává celkem pět naměřených hodnot parametrů na celkové vyhodnocované délce l_n , které po zprůměrování dají výslednou hodnotu daného měřeného parametru. Takto bylo provedeno měření z jedné a druhé delší strany vzorku. Kratší strany vzorku se neměřily, jelikož hrana je příliš krátká na to, aby byly dosaženy co nejlepší možné výsledky

drsnosti, tudíž výsledky by nebyly validní. U plazmového a kyslíkového dělení se měření drsnosti provedlo pouze na jednom vzorku, pouze z jedné strany. [5]



Obr. 45 Schéma měření drsnosti na vzorku.



Obr. 46 Schéma provedeného měření na vzorku.

Měření se tedy provádělo celkem na šesti vzorcích, kdy u laserových řezných hran ze dvou stran a u plazmového a kyslíkového dělení pouze z jedné strany. Dohromady to dává celkem deset zapsaných hodnot z měření. Z každého měření se zaznamenávaly dvě hodnoty parametrů drsnosti – Ra (průměrná aritmetická úchylka zkoumaného profilu) a Rz (největší výška profilu). Norma ČSN EN ISO 9013 označuje parametr Rz jako Rz5 – průměrná výška prvků profilu. Naměřené hodnoty parametrů Ra a Rz pro jednotlivé strany u jednotlivých užitých technologií dělení jsou zaznamenány v příloze 6. V tab. 7 jsou pak zaznamenány pouze průměry hodnot jednotlivých stran u parametrů Ra a Rz pro dvanáctý vzorek a jejich směrodatná odchylka. [5]

Aby mohly být daná data z výsledných hodnot měření jednotlivých parametrů vypočtena a zaznamenána do tab. 7 a přílohy 6, je nutné si zavést jednotlivé vzorce pro:

- Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.1)$$

kde: n – počet hodnot
 x_i – hodnoty naměřených dat

- Směrodatná odchylka:

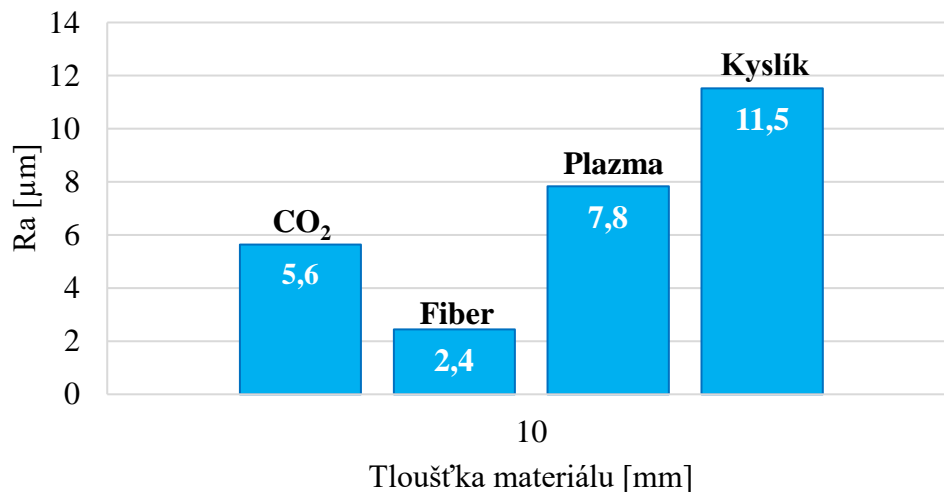
$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.2)$$

kde: \bar{x} – aritmetický průměr

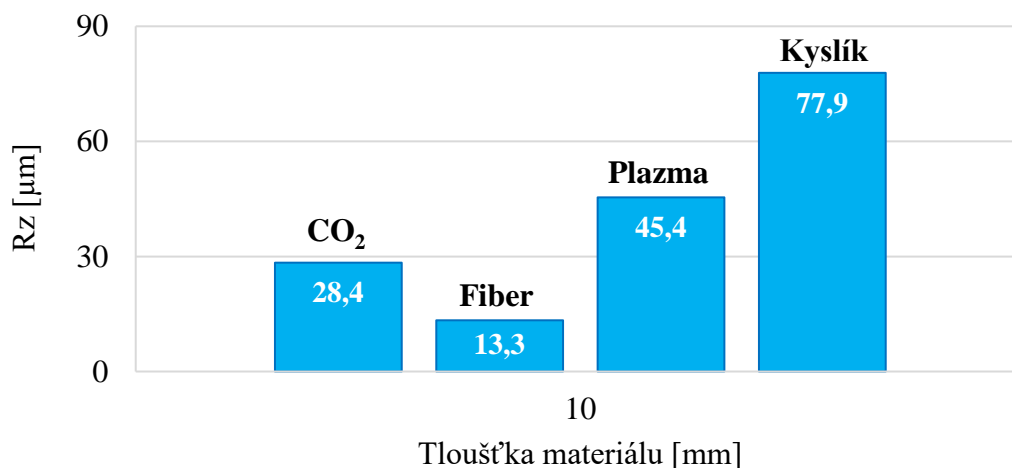
Z grafického znázornění závislosti průměrné aritmetické úchylce zkoumaného profilu a největší výšky profilu na tloušťce materiálu vynesené v grafech na obr. 47 a 48 je patrné, že nejhorší možnou volbou tepelného dělení z hlediska drsnosti je kyslíkové dělení. Jako nejlepší možná volba je pak laserové dělení. U laserového dělení vyšly lepší hodnoty u fibre laseru než u CO₂ laseru i přes to, že z teoretického hlediska vychází CO₂ laserové dělení jako nejlepší možná volba. Tento rozdíl může být způsobený u CO₂ laseru chybným vycentrováním paprsku před začátkem řezání nebo v rozdílu výkonu, kdy u fibre laseru se použil vyšší řezný výkon než u CO₂ laseru a to o 2,4 kW.

Tab. 7 Přehled naměřených zprůměrovaných drsností u daných technologií.

Typ dělení	Parametr drsnosti	Průměrná drsnost [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
CO ₂ laser	Ra	5,6	1,3
	Rz	28,4	6,2
Fibre laser	Ra	2,4	0,5
	Rz	13,3	2,7
Plazma	Ra	7,8	-
	Rz	45,4	-
Kyslík	Ra	11,5	-
	Rz	77,9	-



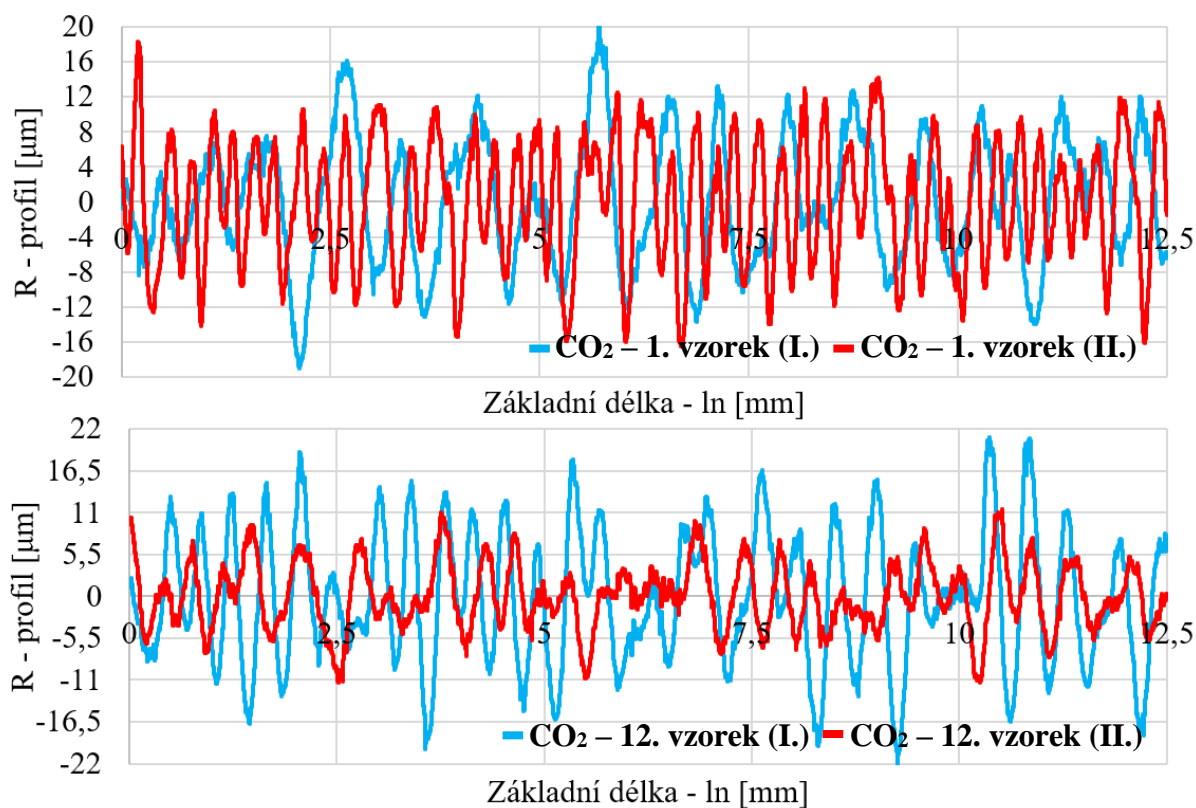
Obr. 47 Graf závislosti průměrné aritmetické úchytky zkoumaného profilu na tloušťce materiálu.



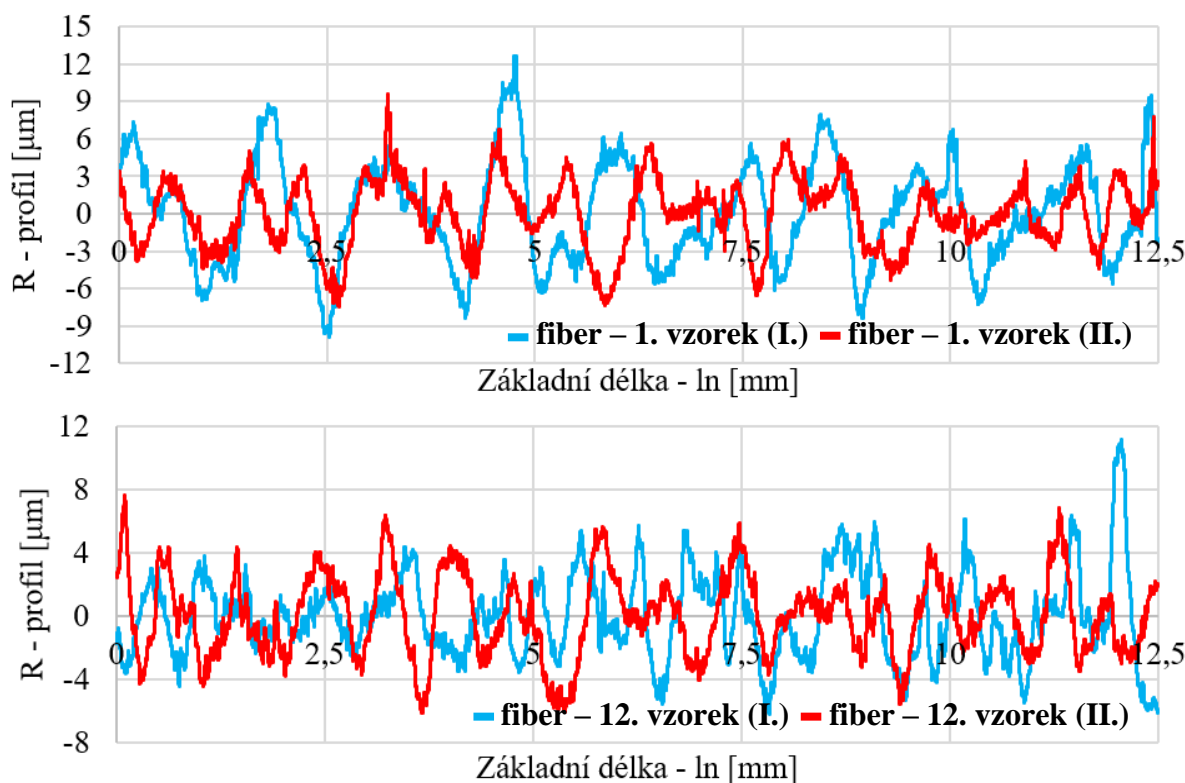
Obr. 48 Graf závislosti největší výšky profilu na tloušťce materiálu.

Na obr. 49, 50 a 51 jsou znázorněny jednotlivé R – profily drsností v závislosti na vyhodnocované délce. Za povšimnutí stojí jednotlivé průběhy drsností, kdy jak již bylo řečeno, nejlepší povrchová drsnost se jeví u technologie fiber laserového dělení a jako nejhorší u kyslíkového dělení. Z těchto grafů lze zpětně určit parametry spadající do R – profilu.

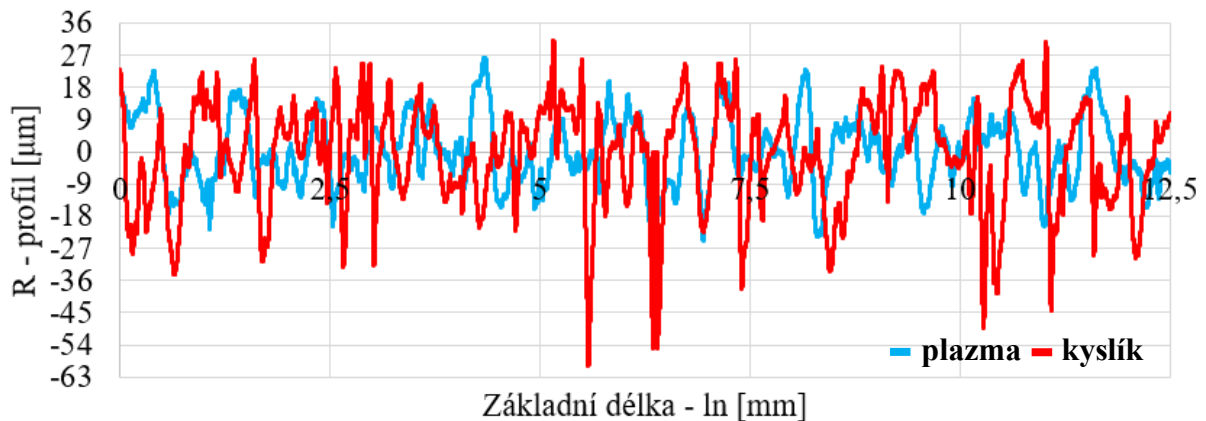
V grafech u laserových dělení (obr. 49 a 50) jsou znázorněny průběhy drsností u prvních a dvanáctých vzorků, které byly změřeny z jedné a druhé strany. V grafu průběhů drsností pro plazmové a kyslíkové dělení (viz obr. 51) jsou znázorněny průběhy změřených drsností u jednoho vzorku z jedné strany jednotlivé metody.



Obr. 49 Graf závislosti drsnosti (R – profilu) na základní délce – ln pro CO₂ laser.



Obr. 50 Graf závislosti drsnosti (R – profilu) na základní délce – ln pro fibre laser.

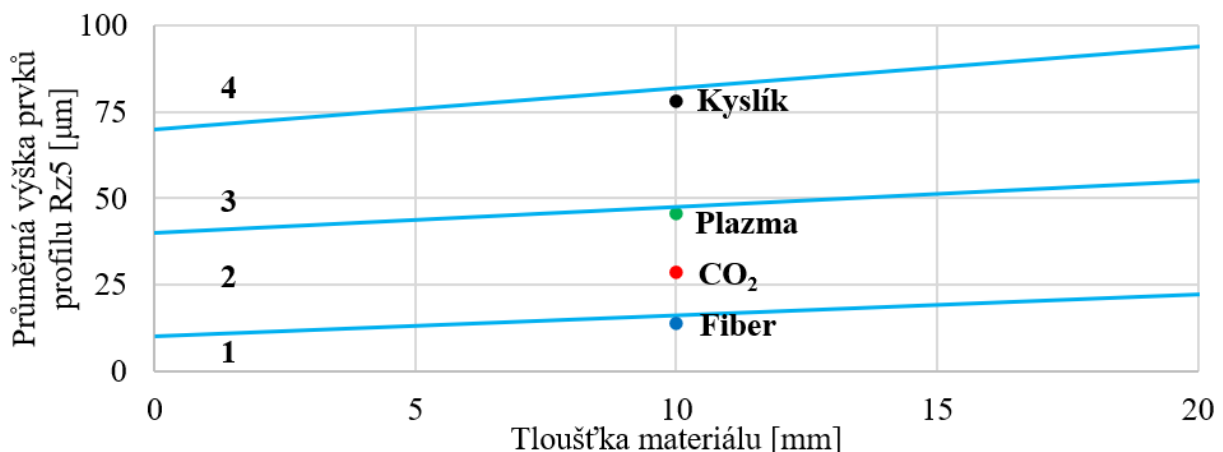


Obr. 51 Graf závislosti drsnosti (R – profilu) na základní délce – ln pro plazmu a kyslík.

3.2 Zhodnocení jakosti řezných hran podle normy ČSN EN ISO 9013

Norma ČSN EN ISO 9013 byla v předešlých kapitolách zmíněná jako norma popisující klasifikaci tepelných řezů technologie laseru, plazmy a kyslíkového plamene, kdy předepisuje pro tyto technologie geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti povrchu řezů nebo technickou dokumentaci. Mezi vyhodnocované parametry patří například průměrná výška prvků profilu – Rz5 neboli v tomto případě parametr největší výšky profilu drsnosti – Rz, dále jsou to úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu – u, skluz – n, otřep, okuje, natavení horní hrany drážkování apod. [5]

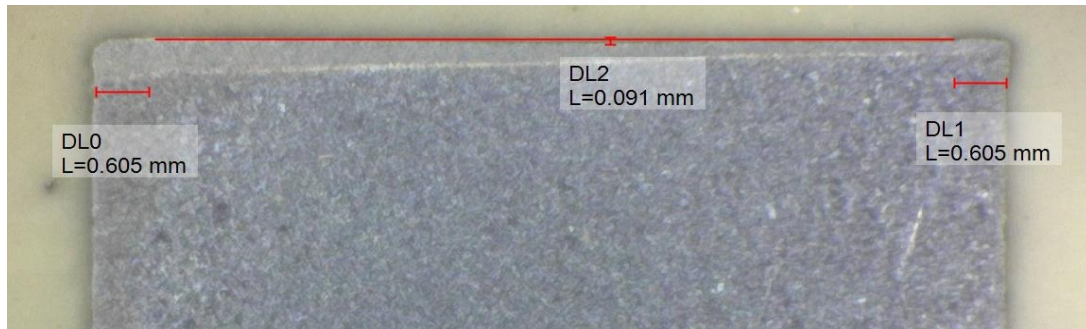
Naměřené hodnoty největší výšky profilu drsnosti Rz, u laserových vzorků se jedná o dvanácté vzorky, se vynesly do grafu udávaného normou, kdy norma udává graf závislosti průměrné výšky prvků profilu Rz5, tedy v tomto případě parametr Rz, na tloušťce materiálu. Norma rozděluje graf do jednotlivých jakostních tříd, kdy jednička udává nejlepší možnou jakostní třídu. Tento graf je znázorněn na obr. 52. V grafu jsou pak vyneseny naměřené zprůměrované hodnoty Rz u dvanáctých vzorků jednotlivých tepelných dělení – laser (CO₂, fiber), plazma a kyslík. Z grafu je patrné, že nejlepší možnou volbou tepelného dělení, co se týče drsnosti řezu, je fiber laser, který drsností spadá do nejlepší možné jakostní třídy jedna. Další v pořadí je CO₂ laser a plazma, kdy tyto technologie dělení drsností spadají do druhé nejlepší možné jakostní třídy. Metoda dělení kyslíkem spadá pak do třetí jakostní třídy a ze všech metod se jeví jako nejhorsí možná volba. [5]



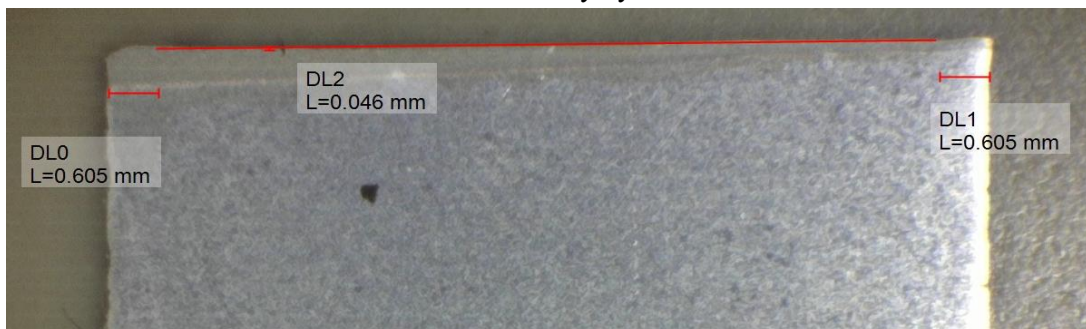
Obr. 52 Graf závislosti Rz5 na tloušťce udávaný normou ČSN EN ISO 9013 [5].

Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu – u je definována jako vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami u svislého nebo šikmého řezu. V tomto případě se jedná o řez svislý. Nejprve je nutné si definovat zmenšení tloušťky řezu – Δa , který se určuje z normou dané tabulky, kdy pro tloušťku materiálu $a = 10$ mm připadá hodnota zmenšení tloušťky řezu

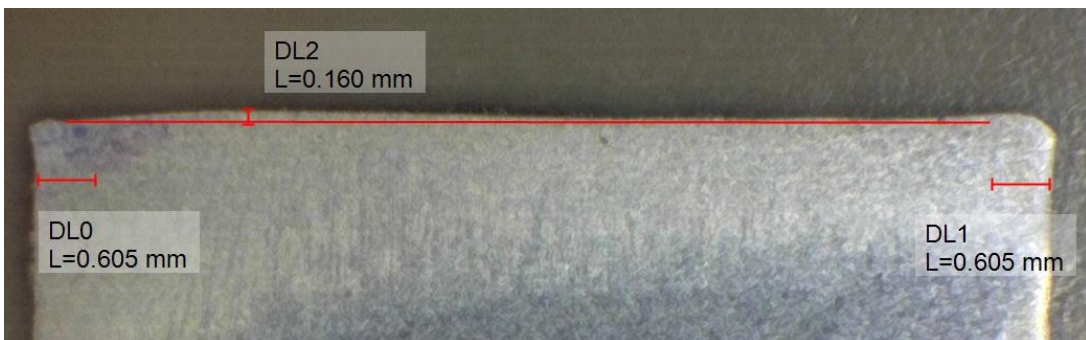
$\Delta a = 0,6$ mm. Tato hodnota, jak je patrné z obr. 53, 54, 55 a 56, se vynesne kolmo na horní a spodní hranu materiálu, rovnoměrně s řezem. Zkoumaná vzdálenost na které se hledá úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu, tedy vzdálenost mezi největším a nejmenším peakem je poté mezi těmito body. V tomto případě jsou výsledné hodnoty u dvanáctých kusů pro CO₂ laser – $u_{CO_2} = 0,091$ mm, fiber laser – $u_{fiber} = 0,046$ mm, plazmu – $u_{plazma} = 0,16$ mm a kyslík – $u_{kyslík} = 0,137$ mm. [5]



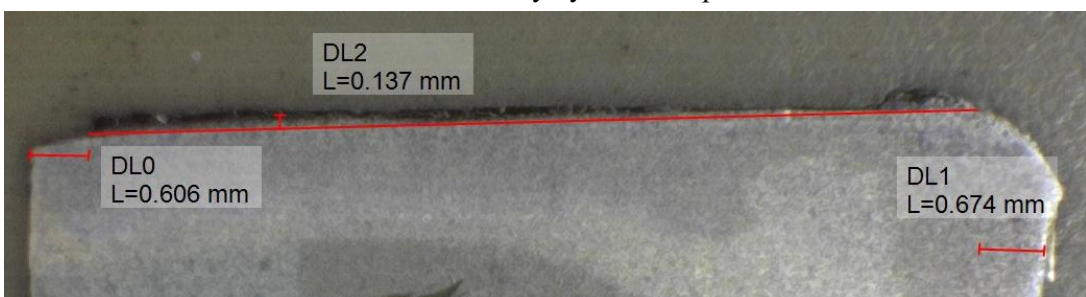
Obr. 53 Schéma zkoumané úchylky kolmosti CO₂ laseru.



Obr. 54 Schéma zkoumané úchylky kolmosti fiber laseru.



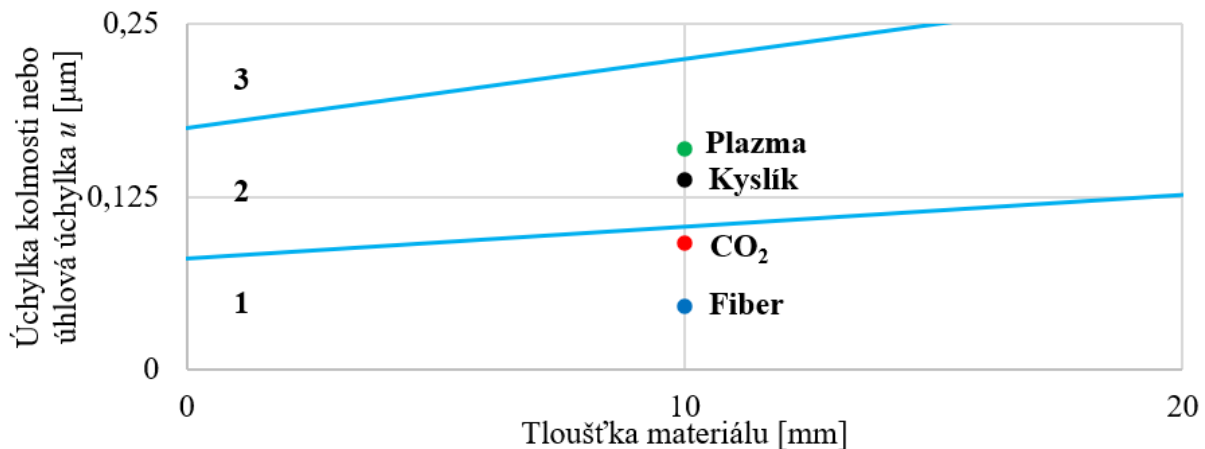
Obr. 55 Schéma zkoumané úchylky kolmosti plazmového dělení.



Obr. 56 Schéma zkoumané úchylky kolmosti kyslíkového dělení.

Tyto hodnoty byly dále vyneseny do normou daného grafu závislosti úchylky kolmosti nebo úchylky úhlu na tloušťce materiálu, který je zobrazen na obr. 57. Graf je rozdělen do jednotlivých jakostních tříd, kdy jako v případě u Rz5 jsou i hodnoty u jednotlivých

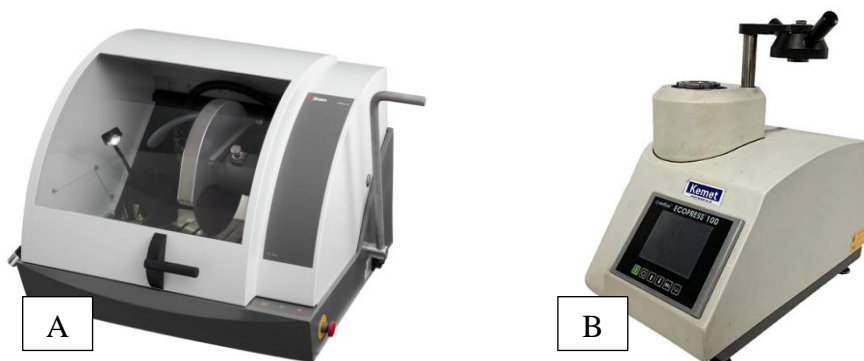
technologií rozděleny do daných tříd. V tomto případě obě laserové technologie spadají do nejlepší možné jakostní třídy, kdy jako nejlepší kolmý řez se jeví, s drobnými niancemi v měření, fiber laser. Do druhé jakostní třídy spadají pak metody plazmového a kyslíkového dělení. Nejhorší metoda dělení podle jakostní třídy kolmosti je plazmové dělení. [5]



Obr. 57 Graf závislosti úchylky kolmosti na tloušťce udávaný normou ČSN EN ISO 9013 [5].

3.3 Měření tvrdosti

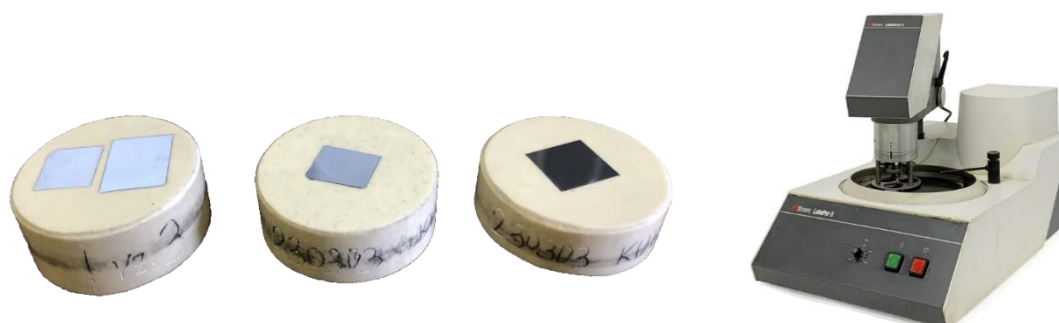
Předtím, než se změřila u vzorků mikrotvrdomost, bylo potřeba učinit následující kroky. Nejprve se na vzorcích udělaly metalografické výbrusy kolmo k ose řezu na metalografické pile Struers Labotom-5 (viz obr. 58), na které byl použit řezný kotouč Stuers 60A25 250 x 1,5 x 32 mm. Tyto výbrusy obsahující tepelně ovlivněnou oblast a základní materiál se poté zalisovaly za tepla při teplotě 200 °C do pryskyřice do tvaru puku na lisu Ecopress 100 (viz obr. 58), jehož výrobcem je firma Metkon. Schéma zalisovaných výbrusů do puků je zobrazen na obr. 59. Po zalisování do puků byl povrch výbrusů broušen a leštěn. Broušení a leštění probíhalo na stroji Struers Labopol-5, který je zobrazen na obr. 59. Broušení se provádělo na brusných papírech pod vodou s postupnou zrnitostí 80, 600 a 1200. Při leštění se použily leštící plátna s diamantovou supenzí s velikostí zrna 9 a 3 μm , kdy na finální doleštění výbrusů byla použita pasta obsahující částice korundu. Aby bylo možné vzorky poté pod mikroskopem pozorovat a určit jejich výslednou strukturu, byly vzorky naleptány 3 % roztokem kyseliny dusičné v čistém lihu – HNO₃ neboli nitalem, užívaný především pro nelegované a nízkolegované oceli.



Obr. 58 Schéma metalografické pily Struers Labotom-5 (A) a lisu Ecopress 100 (B) [55; 56].

Měření hodnot mikrotvrdomosti bylo provedeno Vickersovou metodou na Ústavu materiálového inženýrství u pana doktora Němce. K měření bylo použito zařízení Qness řady Q10A, které je zobrazeno na obr. 60. Jedná se o automatizované zařízení, které je určeno pro zatížení v rozmezí 0,49 ÷ 98,1 N, kdy přístroj umožňuje měřit tvrdost staticko-plastickými metodami dle Vickerse, Brinella nebo Knoop. U dvanáctých vzorků po laserovém dělení a u vzorků po plazmovém a kyslíkovém dělení byla změřena mikrotvrdomost dle Vickerse v tepelně

ovlivněné oblasti. Měření probíhalo v patnácti za sebou jdoucích vpichách v krocích po dvou desetínách milimetrů diamantovým indentorem s vrcholovým úhlem 136° při zatížení 0,2 kgf, což v převodu vypovídá síle 1,961 N. Tyto vpichy byly vedeny kolmo na tepelně ovlivněnou oblast až k základnímu materiálu. Vyhodnocení pak probíhalo v softwaru Qpix Control, který je nedílnou součástí tvrdoměru a je nainstalován do příslušného počítače. Výsledné tvrdosti a změřené úhlopříčky vtisku se dále dají exportovat do výstupního protokolu. [57]



Obr. 59 Schéma zalisovaných metalografických výbrusů a zařízení Struers Labopol-5 [55].



Obr. 60 Schéma tvrdoměru Qness řady Q10A [57].

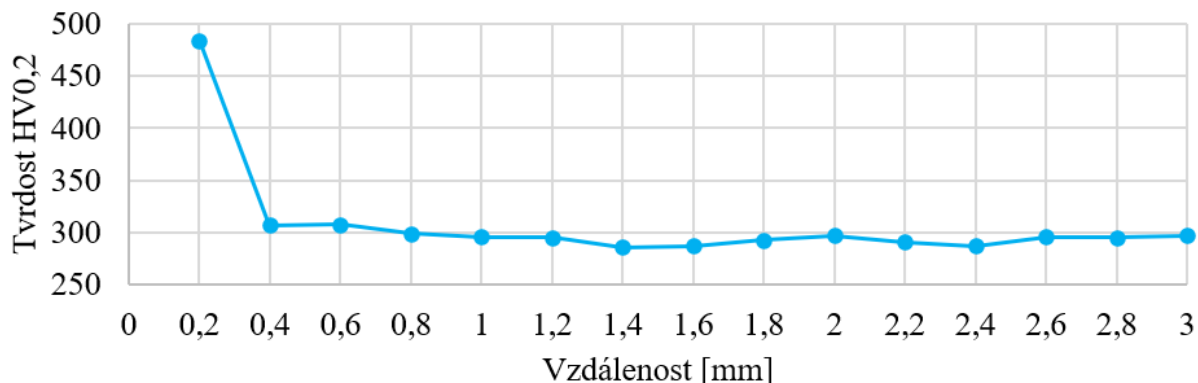
V následujících tabulce a grafech jsou zaznamenány a vyneseny naměřené hodnoty mikrotvrdosti dle Vickerse při daném užitém zatížení. V tab. 8 jsou zaznamenány zprůměrované naměřené hodnoty jednotlivých technologií včetně jejich směrodatných odchylek. Z toho vyplývá, že k největšímu zakalení, tedy i největší tvrdosti, dojde u fiber laseru, kdy tvrdost v průměru dosahuje 316,7 HV 0,2. Nejměkčí tepelně ovlivněná oblast se pak nachází u kyslíkového dělení. Celkové tabulky všech naměřených tvrdostí včetně změřených úhlopříček vtisku jsou zaznamenány v příloze 7.

Tab. 8 Tabulka naměřených zprůměrovaných hodnot tvrdosti u jednotlivých technologií.

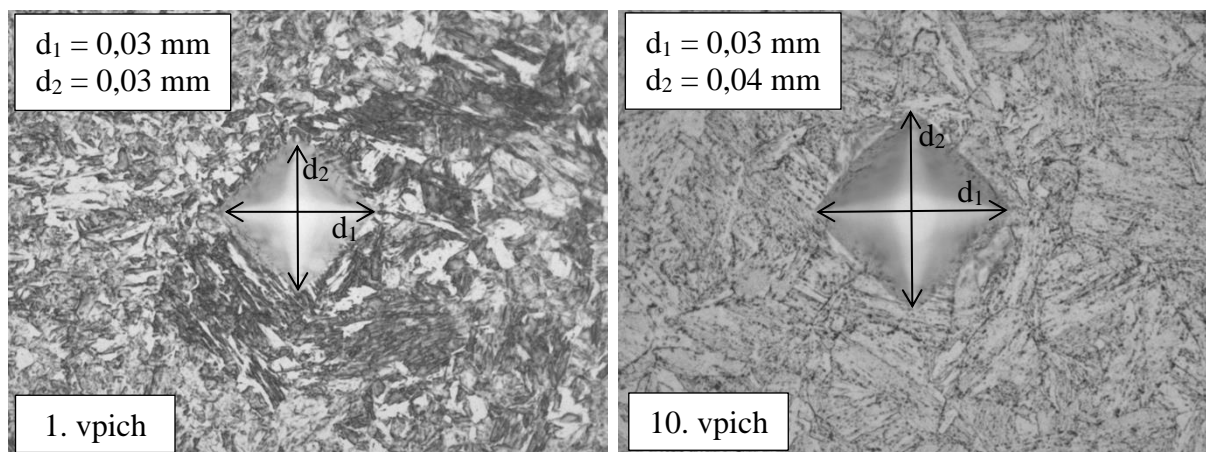
Typ dělení	Průměrná tvrdost HV 0,2	Směrodatná odchylka tvrdosti HV 0,2
CO ₂ laser	307,9	49,1
Fiber laser	316,7	59,9
Plazma	281,2	20,9
Kyslík	268,5	22,9

Dělení CO₂ laserem a tedy i všeobecně laserem je oproti jiným metodám dělení úzce spjaté s velmi malou tepelně ovlivněnou oblastí. Tím, že dochází k lokálnímu ohřevu materiálu laserovým paprskem soustředěným na velmi malou plochu, dojde k vytvoření úzkého pásku tepelně ovlivněné oblasti. Nedojde tak k vysokému přehřátí materiálu a při chladnutí dojde i k výrazně rychlejšímu ochlazení této natavené oblasti okolním materiálem. Vzniknou

tak tvrdší struktury než například u plazmového nebo kyslíkového dělení. Jak lze vidět z grafického znázornění závislosti tvrdosti na vzdálenosti jednotlivých vpichů (obr. 61), šířka tepelně ovlivněné oblasti dosahuje zhruba dvou desetín milimetrů, tudíž maximální tvrdost se nachází v oblasti tepelně ovlivněné oblasti, která dosahovala 484 HV 0,2. Při následujícím vpichu s odstupem 0,2 mm byla už změřena tvrdost základního materiálu, která se pohybuje okolo 300 HV 0,2. Na obr. 62 jsou pak zobrazeny vybrané mikrostruktury vpichů.

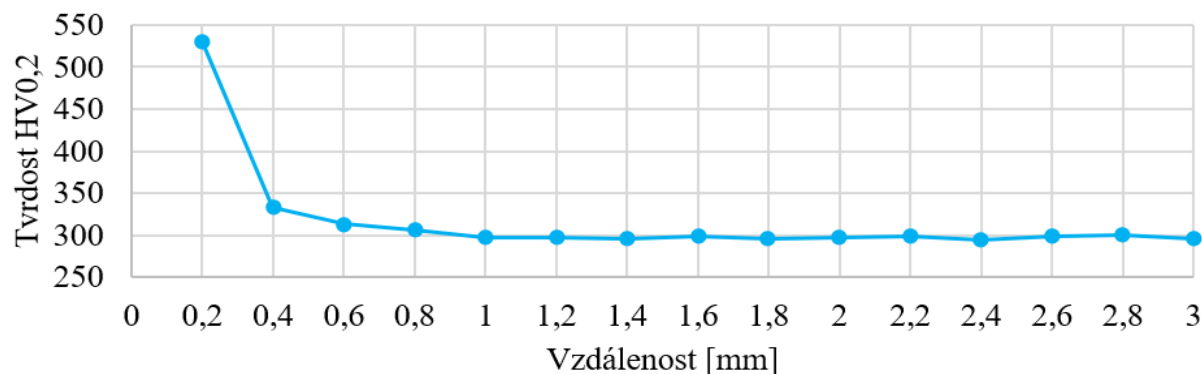


Obr. 61 Grafické znázornění změřených mikrotvrdostí dle Vickerse u CO₂ laseru.

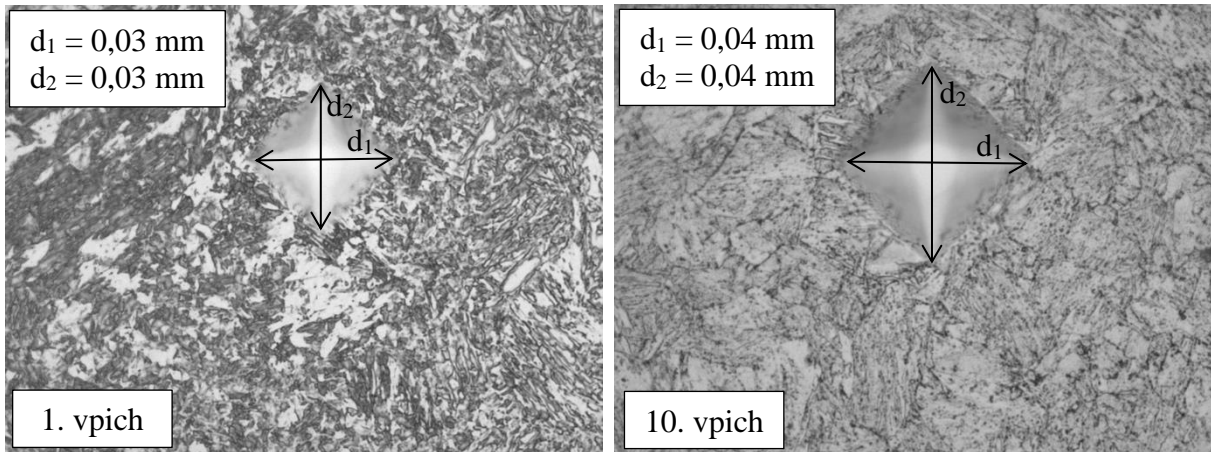


Obr. 62 Schéma mikrostruktur vpichů u vzorků po CO₂ laserovém dělení.

Charakteristika tepelného dělení fiber laserem je téměř totožná s CO₂ laserovým dělením. Jak na plynovém laseru, tak i na fiber vzniká úzký proužek tepelně ovlivněné oblasti, která díky rychlému ochlazení je i relativně tvrdá na rozdíl od základního materiálu. Z grafického znázornění (viz obr. 63) závislosti tvrdosti na vzdálenosti jednotlivých vpichů si lze povšimnout, že tepelně ovlivněná oblast u této technologie je o něco širší než u CO₂ laseru. I tvrdost je u této technologie vyšší, kdy v tepelně ovlivněné oblasti dosahuje hodnoty 530 HV 0,2. Na obr. 64 jsou znázorněny vybrané mikrostruktury vpichů.

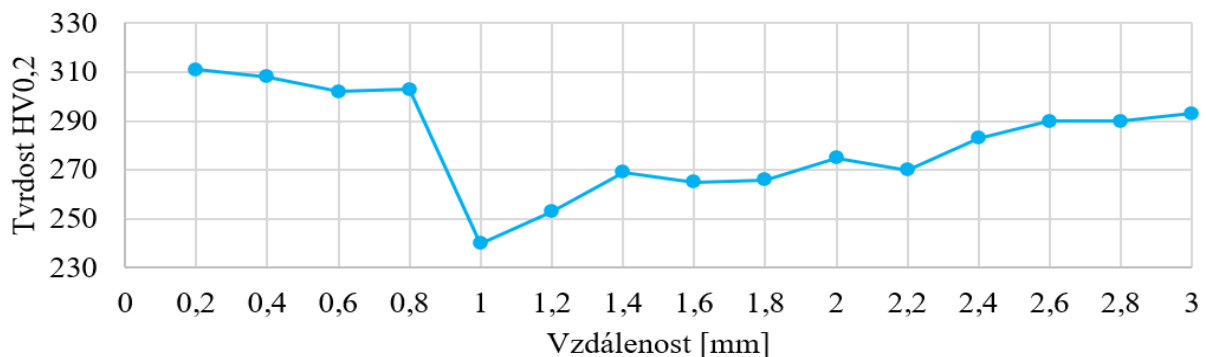


Obr. 63 Grafické znázornění změřených mikrotvrdostí dle Vickerse u fiber laseru.

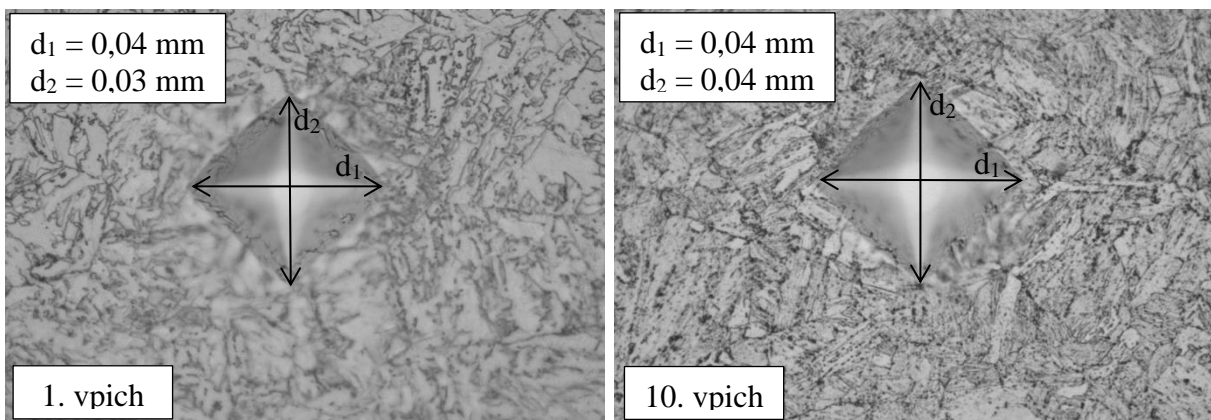


Obr. 64 Schéma mikrostruktur vpichů u vzorků po fiber laserovém dělení.

Z následujícího obrázku (viz obr. 65), zobrazující průběh patnácti naměřených hodnot tvrdosti po plazmovém dělení, lze vyčíst, že při dělení plazmou se do vzorku vnáší velké množství tepla, což má za následek pokles tvrdosti v jistých místech vzorku, tudíž plocha tepelného ovlivnění je značně větší než u jakéhokoliv laserového dělení. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena hned při prvním vpichu, kdy dosahuje hodnoty 311 HV 0,1, což oproti tvrdosti základního materiálu není velký rozdíl. Nejnižší peak tvrdosti byl naměřen v 1 mm od hrany řezu, kdy tato hodnota dosahuje 240 HV 0,2, což může mít za následek vyžhání této oblasti. Poté tvrdost mírně narůstá až do hodnot tvrdosti základního materiálu. Jak si lze povšimnout z obr. 66 v mikrostruktuře prvního vpichu, díky vysokému vnesenému teplu dochází k zhrubnutí zrna, které má za následek pokles pevnosti v tahu, meze kluzu nebo houževnatosti, ale i právě zmíněný pokles tvrdosti.

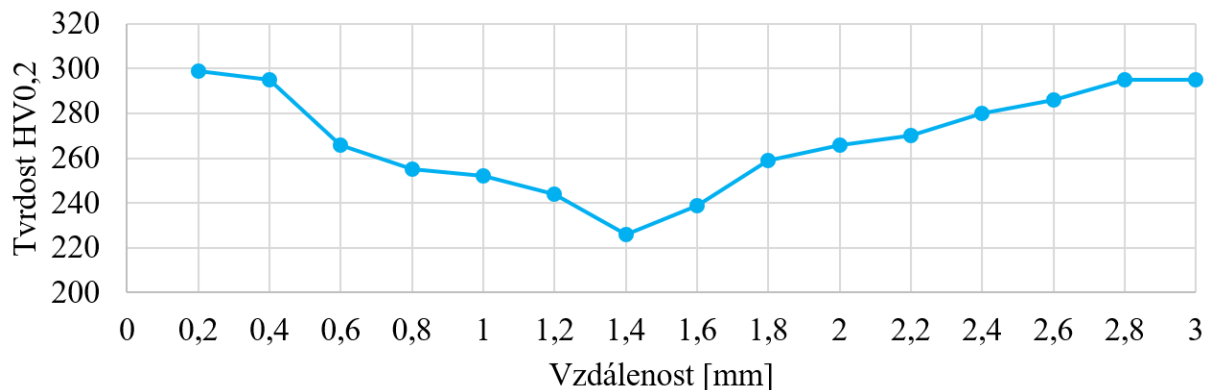


Obr. 65 Grafické znázornění změřených mikrotvrdostí dle Vickerse u plazmy.

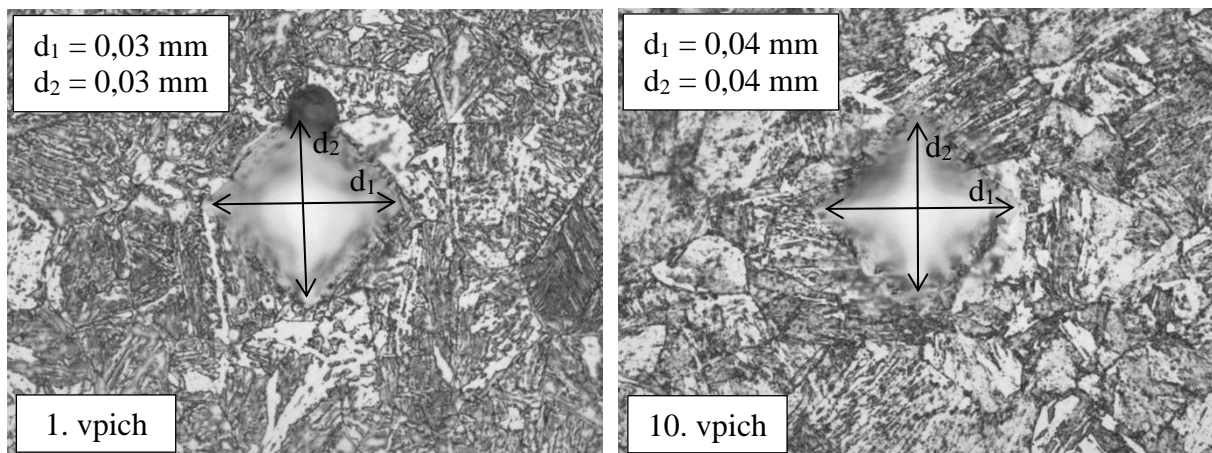


Obr. 66 Schéma mikrostruktur vpichů u vzorků po plazmovém dělení.

Poslední měření mikrotvrdości podle Vickerse v tepelně ovlivněné oblasti bylo prováděno u vzorku děleným kyslíkovou metodou. Tak jako u plazmy, tak i u kyslíku je tepelně ovlivněná oblast značně široká v porovnání s metodami laserového dělení a to z důvodu velkého vneseného tepla při dělení. V tomto případě si na obr. 67 lze povšimnout, že tvrdost na začátku v tepelně ovlivněné oblasti, kde došlo k rychlejšímu ochlazení, je téměř rovna tvrdosti základního materiálu, kdy naměřená hodnota v tomto místě je 299 HV 0,2. S postupem měření tvrdosti tepelně ovlivněné oblasti tvrdost klesá z důvodu hrubnutí zrna a to do vzdálenosti 1,4 mm od hrany řezu, kdy hodnota tvrdosti v tomto místě dosahuje 226 HV 0,2. Poté tvrdost mírně narůstá až do hodnot tvrdosti základního materiálu. Na obr. 68 jsou poté zobrazeny mikrostruktury jednotlivých vpichů.



Obr. 67 Grafické znázornění změřených mikrotvrdości dle Vickerse u kyslíku.



Obr. 68 Schéma mikrostruktur vpichů u vzorků po kyslíkovém dělení.

Z výsledných naměřených hodnot tvrdosti lze vyčíst, že pro dělení použitého materiálu se jeví jako nejlepší laserová technologie. Vyplyvá to z šířky tepelného ovlivnění daného materiálu, kdy u obou laserových technologií je minimální v porovnání s technologiemi plazmového a kyslíkového dělení. To stejné se ovšem nedá říct o tepelném ovlivnění u vzorků po plazmovém a kyslíkovém dělení. Aby byla tepelně ovlivněná oblast u všech metod dělení přesně změřena a vyhodnotila se zde výsledná struktura, je třeba napřed naleptat a poté nafotit makro a mikrostrukturu jednotlivých vyleštěných metalografických výbrusů.

3.4 Zhodnocení makro a mikrostruktury

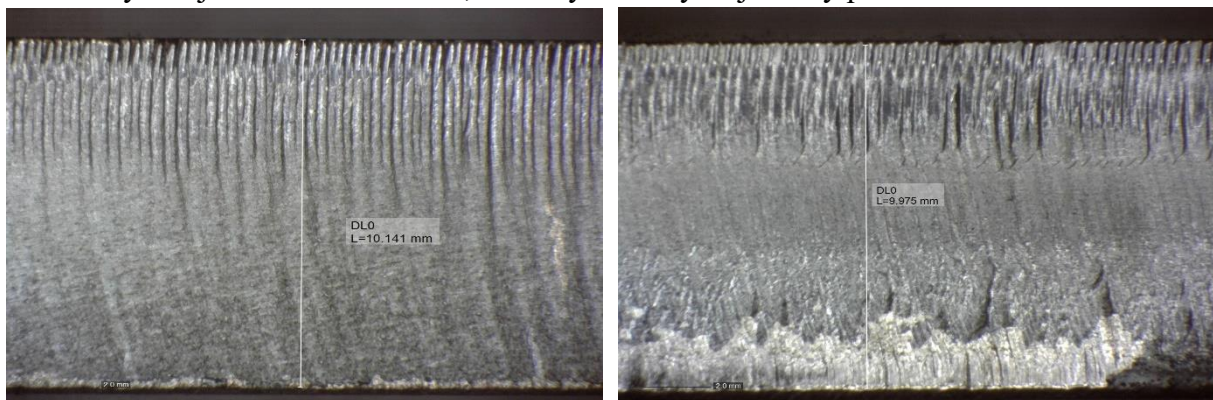
Před samotným pořízením snímku makro a mikrostruktury je třeba naleptat vyleštěné metalografické výbrusy. K leptání se použil 3 % roztok kyseliny dusičné v čistém lihu, neboli nital. Leptání a následné snímky struktur se prováděly na odboru slévárenství ústavu strojírenské technologie. Na inverzním metalografickém optickém světelném mikroskopu

Neophot 32 (viz obr. 69), jehož výrobcem je německá firma Zeiss, se pořídily snímky fotoaparátem Canon EOS 4000D makro a mikrostruktury základního materiálu a tepelně ovlivněné oblasti. U těchto snímků byla zkoumána, jak již bylo řečeno, vzniklá struktura v tepelně ovlivněné oblasti po laserovém, plazmovém a kyslíkovém dělení, a šířka tepelného ovlivnění byla i změřená.



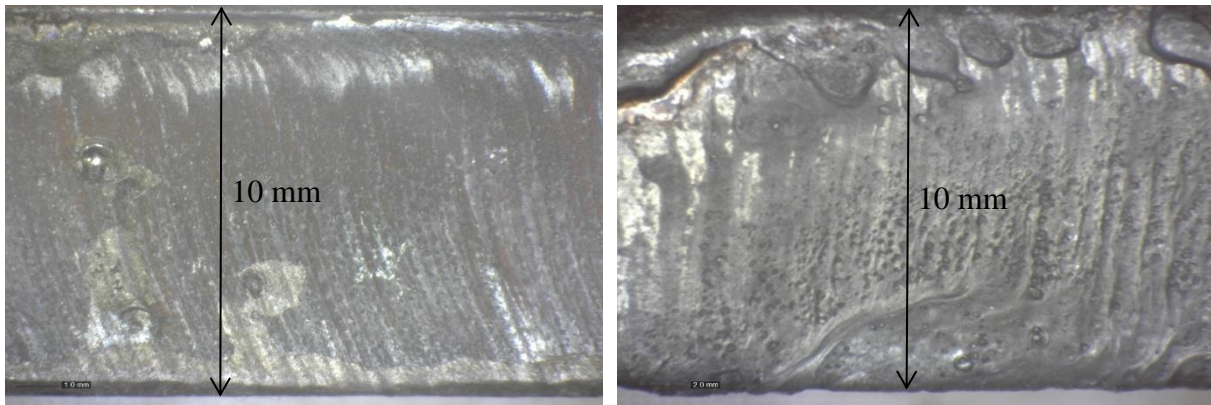
Obr. 69 Schéma optického světelného mikroskopu Zeiss Neophot 32 [54].

Před samotným představením jednotlivých makro a mikrostruktur materiálu je třeba si ukázat zvětšené jednotlivé řezné hrany po daných technologiích. Na obr. 70 jsou zobrazené zvětšené dvanácté kusy řezných hran obou metod laserového dělení. I přes vyšší naměřenou drsnost u CO₂ laserového řezu, které se provádělo zhruba v 1/3 od horní řezné hrany, se jeví tento způsob dělení z hlediska vizuálního pohledu jako neoptimálnější. Je třeba podotknout, že u obou metod dělení byl použitý stejný způsob dělení, tedy za pomoci řezného plynu kyslíku, který jak je dobře známo, má za následek tvorbu okují na řezné hraně, které jsou do značné míry nepřijatelné a je třeba dodat v technologickém postupu přídatné operace na odstranění těchto okují, pokud by bylo po dělení prováděno například svařování nebo jakékoliv povrchové úpravy. Z dalšího vizuálního pohledu dané řezy neobsahují otřepy na spodní hraně řezu nebo nevykazují značné drážkování, které by narušily stejnorodý povrch řezu.



Obr. 70 Schéma řezné hrany CO₂ (nalevo) a fiber (napravo) laseru.

Další schémata řezných hran patří plazmovému a kyslíkovému dělení (viz obr. 71). U metody plazmového dělení byl použit jako řezný plyn vzduch. I přes velké zastoupení neaktivního plynu dusíku aktivní plyn kyslík vytvořil vrstvu strusky na povrchu řezné hrany. Mimo jiné na spodní řezné hraně jsou i mírné otřepy, které může mít za následek nerovnoměrný pracovní stůl plazmy. Z hlediska vizuálního pohledu se jeví řez kyslíkem ze všech metod dělení jako nejhorší. Velké otřepy na spodní řezné hraně v kombinaci s výraznými oxidy na řezné ploše materiálu zásadně ovlivňují výslednou jakost řezné hrany po kyslíkovém dělení.



Obr. 71 Schéma řezné hrany plazmového (nalevo) a kyslíkového (napravo) dělení.

První snímek mikrostruktury na obr. 72 zobrazuje strukturu základního materiálu. Jak je zmíněno v cílech práce, zkoumaným materiálem v této diplomové práci pro laserové, plazmové a kyslíkové dělení je nízkouhlíková konstrukční vysokopevnostní ocel s komerčním názvem IMEX 700 o tloušťce 10 mm s obsahem uhlíku do 0,2 %. Norma ČSN EN 10025-6 označuje tuto ocel jako S 690 QL (popis značení podle normy ČSN EN 10027-1), což značí, že se daná ocel nachází v zušlechtěném stavu, tedy kombinace martenzitického kalení a vysokoteplotního popouštění, a je schopna odolávat nárazové práci do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Celková tabulka mechanických vlastností a chemického složení materiálu je zobrazena v tab. 1. Jak je patrné z mikrostruktury základního materiálu, struktura užitého materiálu je tvořena bainitem, martenzitem a zbytkovým austenitem. Svoji zušlechtěnou strukturou nebo také mechanickými vlastnostmi a chemickým složením lze danou ocel zařadit do tzv. AHSS ocelí, neboli Advanced High Strength Steels – pokročilé vysokopevnostní oceli. Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, jedná se o oceli, které jsou vícefázové, tedy obsahují například právě bainit, martenzit a zbytkový austenit, tak jako je to v tomto případě u oceli S 690 QL. Tvrdost základního materiálu se pohybuje okolo 300 HV 0,2, což je typické pro danou strukturu dané vysokopevnostní oceli. [7; 8; 58]

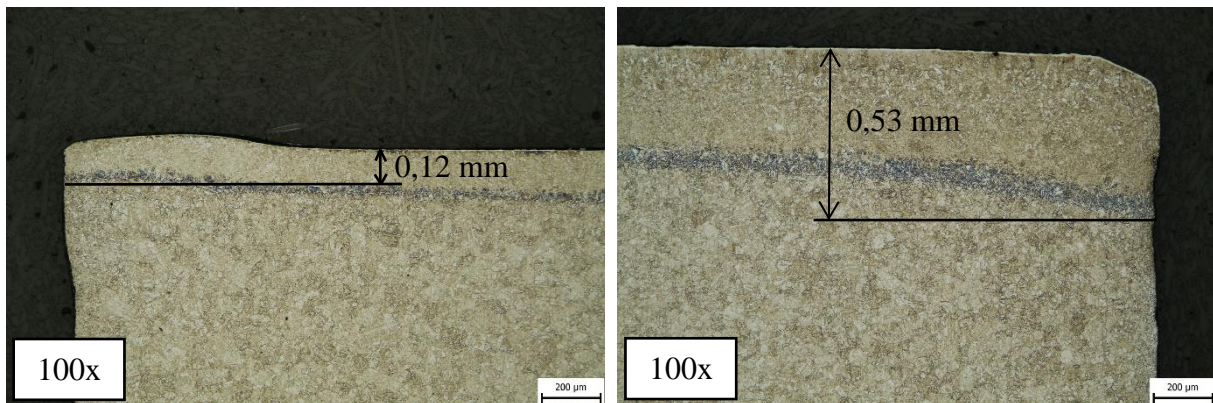


Obr. 72 Mikrostruktura základního materiálu vysokopevnostní oceli IMEX 700 zvětšený 400x.

Tepelně ovlivněná oblast je část základního materiálu, která vzniká lokálně vnesením velkého tepla a následným rychlým ochlazením kovu, kdy velký podíl na ochlazení má odvod tepla do základního materiálu nebo ochlazení okolním prostředím. Tento jev vede ke strukturálním lokálním změnám v materiálu a změnám v mechanických vlastnostech. Na následujících

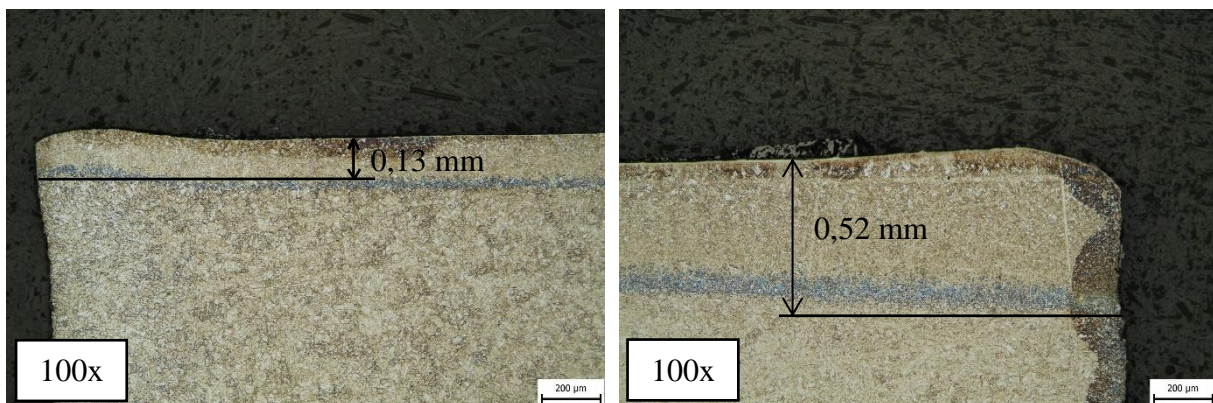
obrázcích makrostruktur metalografických vyleštěných a naleptaných výbrusech řezaných kolmo na osu řezu jsou zobrazené tepelně ovlivněné oblasti pro jednotlivé užití technologie. Mimo jiné jsou zde vyfocené i mikrostruktury vzniklých struktur v tepelně ovlivněné oblasti. Lze na nich vyzorovat jednotlivé podoblasti tepelně ovlivněné oblasti. Směrem do středu základního materiálu se zde střídá vysoce přehřátá oblast, která má za následek hrubnutí zrna, oblast normalizačního žíhání, které způsobuje zjemnění zrna až do oblasti částečné překrystalizace, která je na makrostrukturách zobrazena jako šedý pruh před základním materiálem. Šířky těchto oblastí byly změřeny ručně přes měřítko, proto naměřené hodnoty jsou pouze orientační. [51; 58]

První snímky vypovídají o makrostruktuře řezu, který byl proveden CO₂ laserem. Na obr. 73 lze vidět horní stranu řezu, vstupní místo paprsku, kdy v této části tepelně ovlivněná oblast dosahuje své největší šířky a to 0,53 mm při stonásobném zvětšení. S postupnou vzdáleností od horní strany řezu šířka tepelně ovlivněné oblasti klesá, kdy z toho stejného obrázku je patrná dolní strana řezu, kdy v této části tepelně ovlivněná oblast dosahuje šířky 0,12 mm. Lze si povšimnout i mírného zaoblení na horní hraně řezu po vstupu paprsku.

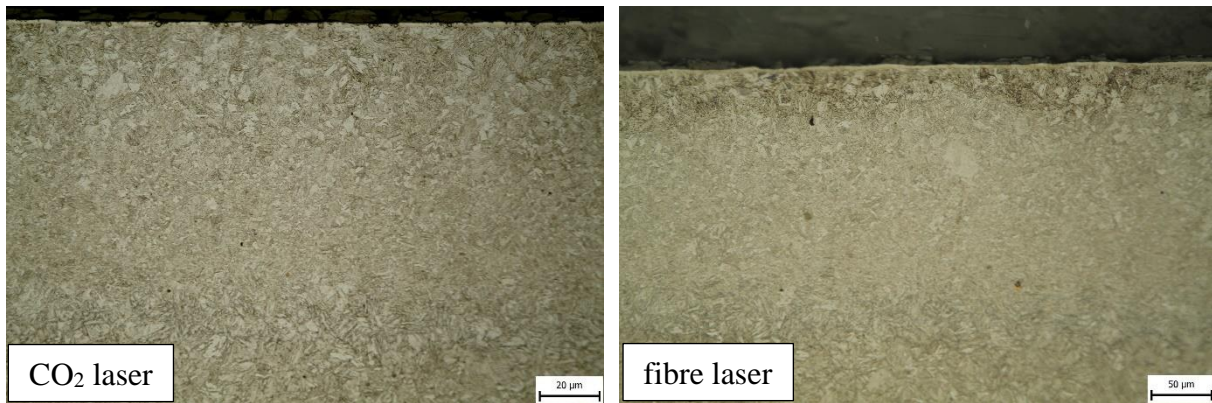


Obr. 73 Makrostruktura horní (napravo) a dolní (nalevo) strany řezu po dělení CO₂ laserem.

Stejně průběhu tepelného ovlivnění si lze povšimnout i u fiber laserového dělení, kdy makrostruktura dvanáctého vzorku, vyleštěného a naleptaného metalografického výbrusu provedeného kolmo na osu řezu, je zobrazena na obr. 74. Šířka tepelného ovlivnění na horní straně řezu, tedy v místě vstupu paprsku, dosahuje 0,52 mm. Na spodní straně řezu dosahuje nižší šířky a to 0,13 mm. Z tohoto hlediska lze uvažovat, že výsledné šířky tepelných ovlivnění u obou metod laserového dělení jsou de facto zanedbatelné, jelikož jejich šířka je minimální. Na obr. 75 jsou pak detailněji zobrazené mikrostruktury tepelně ovlivněných oblastí obou laserových metod dělení.

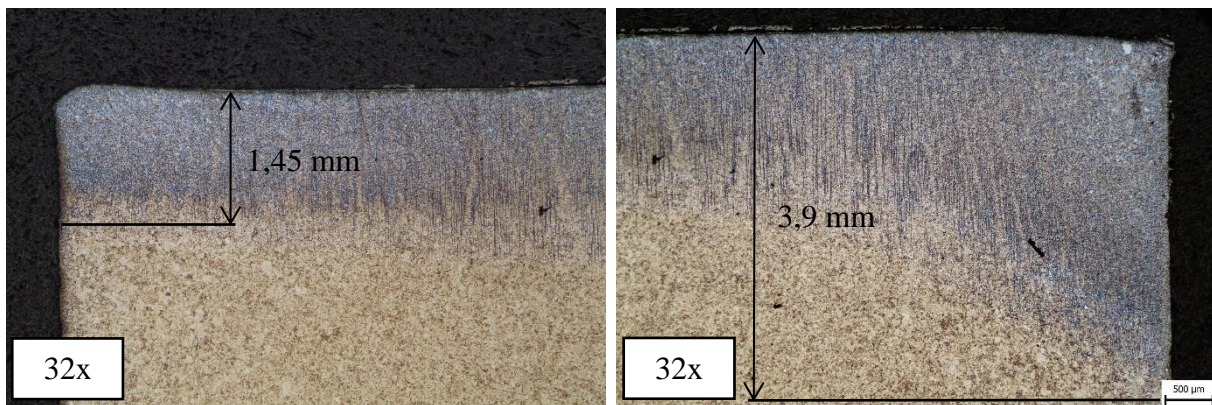


Obr. 74 Makrostruktura horní (napravo) a dolní (nalevo) strany řezu po dělení fiber laserem.



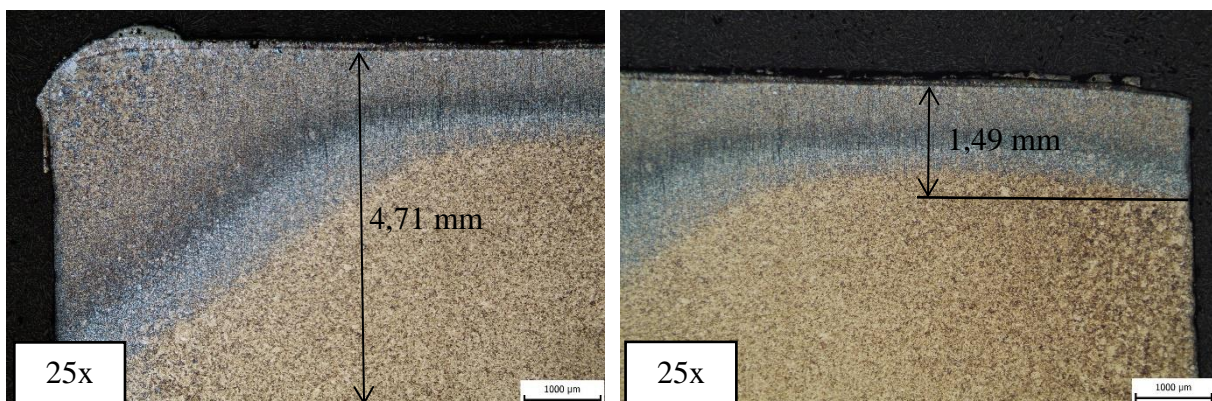
Obr. 75 Mikrostruktur tepelně ovlivněných oblastí CO₂ a fibre laseru při zvětšení 400x.

Makrostruktura tepelně ovlivněné oblasti po plazmovém dělení, zobrazené na obr. 76, se do středu základního materiálu mění a v porovnání s tepelně ovlivněnými oblastmi po laserových dělení je značně širší a to díky velkému vnesenému teplu. Tepelné ovlivnění na horní straně řezu, po vstupu plazmového paprsku, dosahuje 3,9 mm a při jeho výstupu pak na dolní straně řezu 1,45 mm, což je značně větší šířka než u vzorků po laserovém dělení.

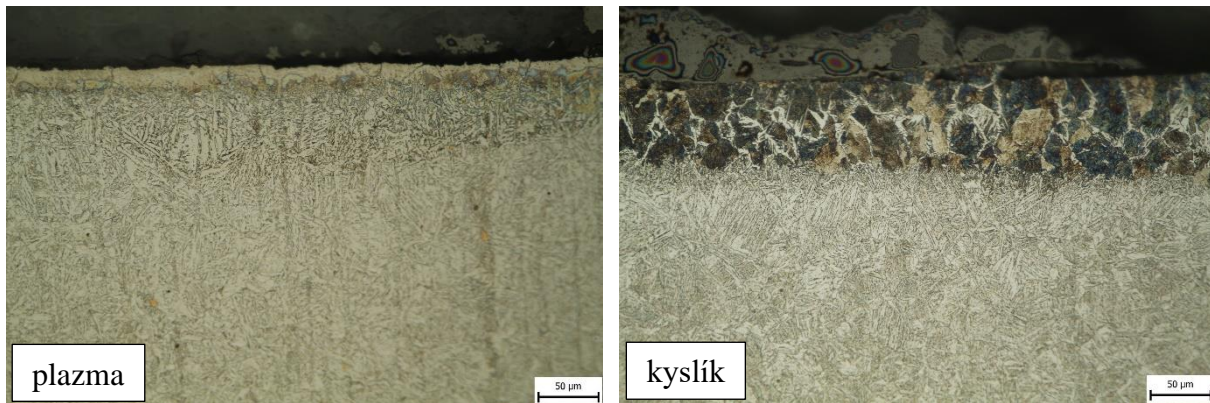


Obr. 76 Makrostruktura horní (napravo) a dolní (nalevo) strany řezu po plazmovém dělení.

Tak jako u plazmy, tak i u kyslíkového dělení se jeví z makrostruktury vzorku, jak je patrné z obr. 77, tepelně ovlivněná oblast značně širší v porovnání s tepelně ovlivněnou oblastí u vzorků po laserovém dělení, což zapříčiňuje velké vnesené teplo a tedy velké přehřátí. V tomto případě dosahuje tepelné ovlivnění šířky na horní straně řezu 4,71 mm a na dolní straně řezu 1,49 mm. Lze také pozorovat barevné přechody oblastí tepelného ovlivnění. K povšimnutí je také velké zaoblení horní řezné hrany po vstupu plamene.

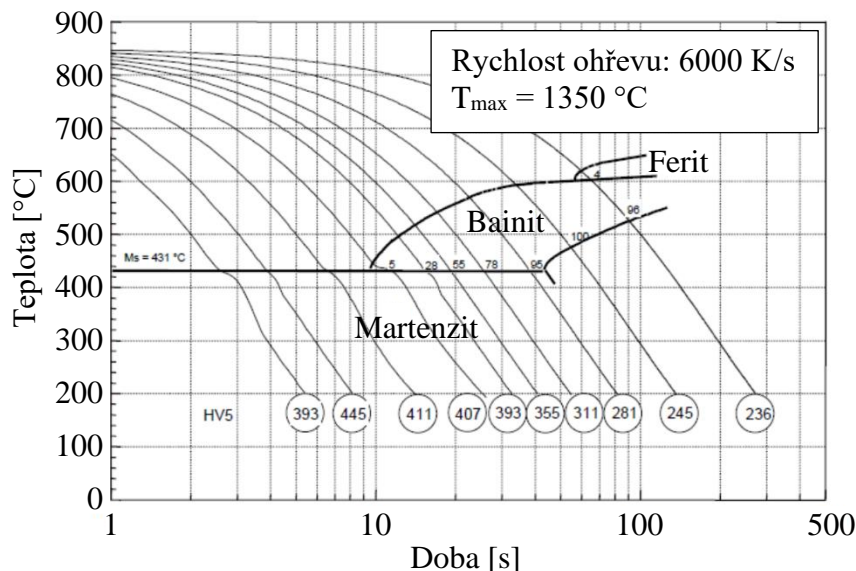


Obr. 77 Makrostruktura horní (nalevo) a dolní (napravo) strany řezu po kyslíkovém dělení.



Obr. 78 Mikrostruktur tepelně ovlivněných oblastí kyslíku a plazmy při zvětšení 400x.

Pro bližší teoretické určení vzniklých struktur v tepelně ovlivněné oblasti slouží ARA diagram pro vysokopevnostní ocel S 690 QL s procentuálním obsahem uhlíku do 0,2 %, zobrazený na obr. 79. Tento diagram je vyňatý z článku [58], který pojednává o mikrostrukturních charakteristikách a mechanických vlastnostech právě u vysokopevnostní oceli S 690 QL svařované elektronovým paprskem. Z naměřených tvrdostí tepelně ovlivněných oblastí, jejichž průběhy jsou zobrazeny v předešlé kapitole na obr. 61, 63, 65 a 67, a za použití ARA diagramu pro danou ocel s nafocenými mikrostrukturami zobrazenými na obr. 75 a 78, lze konstatovat, že na úplné hraně řezu v tepelně ovlivněné oblasti u laserových technologií se nachází martenzit spolu se zbytkovým austenitem. Dále u plazmy se v nejtvrďší oblasti může nacházet zbytkový austenit spolu s martenzitem a bainitem. V nejměkčí oblasti pak ferit se zbytkovým austenitem a bainitem. U kyslíkového dělení se pak v nejměkčí oblasti objevují ferit s bainitem a zbytkovým austenitem. Z mikrostruktury po kyslíkovém dělení zobrazené na obr. 78 je patrná oduhlíčená oblast, ve které lze zpozorovat Widmanstättenova struktura. [51; 58]



Obr. 79 ARA diagram pro vysokopevnostní ocel S 690 QL [58].

Z názorných ukávek makro a mikrostruktur na vzorcích vysokopevnostní oceli IMEX 700, neboli dle normy S 690 QL, dělenými CO₂ a fiber laserem, plazmou a kyslíkem vycházejí jako nejlepší možná volba všeobecně laserové technologie dělení, jelikož šířka tepelně ovlivněné oblasti je v porovnání s ostatními technologiemi dělení minimální. Dále lze vypořadovat, že natavené horní hrany a dolní hrany řezu jsou u laserové technologie taktéž minimální.

3.5 Vyhodnocení experimentu

Jakostní rozdíly v řezech u CO₂ a fiber laserového, plazmového a kyslíkového dělení spadající do normy ČSN EN ISO 9013, která je určena ke klasifikaci tepelného dělení právě u těchto technologií, prováděné na vysokopevnostní oceli s komerčním názvem IMEX 700 tloušťky 10 mm, kdy norma ČSN EN 10025-6 uvádí tuto ocel pod názvem S 690 QL, jsou následovné.

U laserových metod dělení se k experimentu použil CO₂ laser TRUMPF TruLaser 3040 s plynovým rezonátorem TruFlow 4000 o výkonu 4 kW a pevnolátkový fiber laser TRUMPF TruLaser 3030 fiber s diskovým rezonátorem TruDisk 6001 o výkonu 6 kW. U obou laserových metod byl použit oxidační způsob dělení, tedy řezný plyn kyslíku, kdy se tímto plynem vyřezalo celkem dvanáct kusů vzorků o velikosti 100 x 30 mm a k následnému měření se vzal pouze první a dvanáctý kus, jelikož obecně první kusy bývají z hlediska jakosti v porovnání s dvanáctými kusy nedokonalé. Kyslík jako takový je aktivní plyn, který napomáhá k lepšímu natavení materiálu při řezání, tudíž není potřeba užít plný výkon nebo tlak plynu k vynášení roztaveného kovu ven z řezné spáry. Nevýhodou je, že při dělení roztavený kov spolu s okujemi, kdy železo se váže při tavení kovu na kyslík a vzniká oxid, obalují řeznou hranu. Díky tomu je drsnost řezných hran na první pohled, ale také z naměřených hodnot kontaktním profilometrem, velice nízká. Nevýhodou jsou ovšem vzniklé okuje na povrchu řezné hrany, které jsou do jisté míry nepřijatelné. Pokud by byly v následujících krocích zvoleny další operace prováděné na dílcích, jako je například svařování nebo různé povrchové úpravy, doporučuje se odstranit okuje z řezných hran k zamezení potenciálních problémů. Jako alternativa k zamezení vzniku okujů by se dala zvolit tavná metoda dělení, která užívá neaktivní řezné plyny. Nejužívanější neaktivní plyn a také nejlevnější je dusík, který na rozdíl od kyslíku nezpůsobuje tzv. exotermickou reakci, tedy doplňkové spalné teplo, které napomáhá k lepšímu natavení materiálu. Díky neaktivnímu plynu je řez čistý, kovově lesklý, bez okujů. Nevýhodou je však vzniklá drsnost, která je oproti kyslíkovému řezu daleko vyšší a cena dusíku, která je v porovnání s kyslíkem také vyšší. Při tavné metodě se obecně používá několikanásobně vyšší tlak plynu a s tím i spjatý větší průměr trysky, nižší řezná rychlost a vyšší řezný výkon. To vše vede k vyšší provozní ceně, tedy do jisté míry se tato metoda dělení nevyplatí. V příloze 8 a 9 jsou znázorněné tabulkové sbírky doporučených parametrů uváděné samotným výrobcem pro oba užití lasery. Mimo jiné jsou zde i znázorněné teoretické spotřeby plynu, kdy u CO₂ laseru se tato spotřeba pohybuje okolo 1,5 m³·h⁻¹ se spotřebou na metr délky 0,012 m³·m⁻¹ a u fiber laseru 1,7 m³·h⁻¹ se spotřebou na metr délky 0,015 m³·m⁻¹. Je třeba si povšimnout i řezného času, který byl měřen u obou laserových metod i s počátečním zápichem. Díky vyššímu užitému výkonu u fiber laseru s čímž souvisí vyšší zvolená řezná rychlost se čas potřebný k vyřezání dvanácti vzorků liší v porovnání s CO₂ laserem zhruba o 30 s ve prospěch fiber laseru, což je u dvanácti vyřezaných vzorků velký rozdíl.

Z výsledků z experimentu měření drsnosti u vzorků dělených laserem s následným zařazením do jakostního grafu uváděného normou ČSN EN ISO 9013 se jeví jako nejvýhodnější metoda fiber laserového dělení, která spadá do nejlepší možné jakostní třídy, ovšem nemusí tomu být tak. Při měření drsnosti se drsnost měřila dle normy ČSN EN ISO 9013 u prvního a dvanáctého vzorku z jedné i druhé strany vzorku zhruba centimetr od kraje v 1/3 od horní řezné hrany. Pokud se zaměříme na obr. 70, zjistí se, že z vizuálního hlediska v 1/3 řezná hrana po CO₂ laserovém dělení dosahuje nejvyšší drsnosti, ve zbytku je vizuální drsnost úplně minimální v porovnání s řeznou hranou po fibre laserovém dělení. Z grafického znázornění R – profilu u dvanáctého vzorku po CO₂ laserovém dělení zobrazený na obr. 49 je patrné, že změřená drsnost z jedné strany je velice rozdílná v porovnání se změřenou drsností druhé strany téhož vzorku. Tato nerovnoměrnost může být způsobená špatným vycentrováním paprsku v trysce.

Tvrdość, prováděná staticko-plastickou zkouškou dle Vickerse, s šířkou tepelně ovlivněné oblasti u laserového dělení je i přes velkou tvrdość, těsně u řezné hrany s následným strmým přechodem rovno tvrdości základního materiálu, téměř zanedbatelná a to díky šířce tepelně ovlivněné oblasti, která dosahuje u obou metod dělení v průměru 0,3 mm. Obě metody dělení jsou tedy tvrdočně s šířkou tepelného ovlivnění na tom podobně. Téměř zanedbatelná šířka tepelného ovlivnění se dá případně odstranit následnou operací broušení, která slouží i k odstranění vzniklých okují.

Metody plazmového a kyslíkového dělení vyšly ze všech metod dělení jakostně úplně nejhůře. U obou metod dělení se na mechanicky vedené vzduchové plazmě a kyslíkovém hořáku vyřezal pouze jeden vzorek jedním lineárně přímým řezem, kdy jako u vzorků po laserovém dělení se u těchto dvou vzorků změřila drsnost, tvrdość a šířka tepelně ovlivněné oblasti včetně přibližného určení vzniklých struktur. Obě metody vnáší do základního materiálu velké teplo, které způsobí, jak je patrné z obr. 76 a 77, velkou šířku tepelného ovlivnění základního materiálu. Díky tepelnému ovlivnění základního materiálu vzniknou v těchto místech i struktury, které mají značný vliv na průběh tvrdości. V tomto případě u plazmového a kyslíkového dělení jsou naměřené tvrdości menší v porovnání s laserovými metodami, ovšem vzniklé struktury v závislosti na tvrdości jsou s požadovanými strukturami a s tím i spjaté mechanické vlastnosti základního materiálu odlišné a do jisté míry nepřijatelné.

Na první pohled vzhled řezné hrany u kyslíkového dělení, ale i plazmového dělení, zobrazené na obr. 71, není příliš reprezentativní. Měření drsnosti se provádělo také za pomoci normy ČSN EN ISO 9013. Měření probíhalo zhruba centimetr od kraje hrany ve 2/3 od horní řezné hrany. U vzorku po kyslíkovém dělení, při vyhodnocovaných parametrech Ra a Rz, byly naměřené hodnoty drsnosti více než dvojnásobně vyšší v porovnání se vzorky dělenými laserovou technologií. U plazmového dělení jsou naměřené drsnosti lepší v porovnání s kyslíkovou metodou dělení. Co se týče zařazení do jakostní třídy drsnosti uvádějící norma ČSN EN ISO 9013, plazmové dělení spolu s CO₂ laserovým dělením spadají do druhé nejlepší jakostní třídy, kyslíkové dělení pak do třetí jakostní třídy.

Ze všech metod dělení užitých v tomto experimentu je jako nejlepší možná volba v přesném strojírenství používání laserového dělení. V porovnání s plazmovým a kyslíkovým dělením je laser přesnější, jakostně kvalitnější, ekonomicky výhodnější a dokáže koncentrovat veškerou svou energii na velmi malou plochu, což způsobí malou šířku tepelného ovlivnění. Další nevýhodou plazmového a kyslíkového dělení je velká spotřeba plynu, kterou umocňuje malá posuvová rychlost hořáku. Co se týče pořizovací ceny, plazma a kyslík je v porovnání s pořizovací cenou laserového zařízení výhodnější a dostupnější. Repasované lasery se pohybují v rámci miliónů korun a zbrusu nové v rámci desítek miliónů korun, vše záleží na výběru výkonu rezonátoru, kdežto plazmový zdroj nebo kyslíkové a acetylenové plynové láhve se pohybují v rámci tisíců desetitisíců až statisíců korun. Další výhodou kyslíku a plazmy je velká tloušťková různorodost dělení, kdy u obou metod dělené tloušťky dosahují stovek milimetrů nezávisle na druhu a čistotě materiálu, ovšem s omezenou přesností a jakostí. U laserů je možné dělit jen omezené tloušťky a jen vybrané, téměř neodrazivé materiály v závislosti na výkonu rezonátoru.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Poslední částí je zhodnocení z hlediska ekonomiky řezu u strojů TRUMPF TruLaser 3040 s plynovým 4 kW rezonátorem a TRUMPF TruLaser 3030 fiber s diskovým 6 kW rezonátorem na 10 mm vysokopevnostní oceli IMEX 700, tedy kolik korun stojí hodina řezu při kontinuálním dělení dané oceli. Následně zveřejněné hodnoty spotřeby jsou jen teoretické a vzaté z jednotlivých příruček daného strojního zařízení. Ceníky elektřiny a plynů jsou lehce zaokrouhleny a odpovídají cenám za duben 2023. Do výpočtu hodinové sazby stroje jsou v následujících krocích zahrnuty tyto parametry – pořizovací cena (z toho pět let odpisové doby), mzda pracovníka (350 Kč), elektrická energie (5 Kč), technické plyny, stlačený vzduch, servis a náklady na díly. Dále je počítáno s celkem 250 pracovními dny po dvou směnách s osmihodinovou směnou, což odpovídá 4160 hod·rok⁻¹. V tab. 9 jsou zobrazené základní parametry obou laserů, které jsou základními kameny pro následující výpočet. [4]

U CO₂ laseru se dá předpokládat vyšší hodinová sazba stroje a to z důvodu vysokého odběru plynů jak řezného, tak i technických plynů zásobující rezonátor, velmi nízké účinnosti, která se pohybuje okolo 5% a vyšší pořizovací ceny stroje v porovnání s pořizovací cenou fiber laseru (při stejném výkonu rezonátoru). Tak nízká účinnost je úzce spjatá s chlazením zrcadel, kdy díky velké dráze, kterou paprsek musí urazit, odchází příliš mnoho tepla. U fiber laseru jsou zrcadla nahrazena optickými kabely a tudíž díky tomu má fiber laser i daleko vyšší účinnost.

Hodinová sazba a cena za metr řezu u CO₂ laserového dělení prováděné na 10 mm vysokopevnostní oceli IMEX 700 je následující: [4; 9]

- Odpisy CO₂ laseru za hodinu:

$$N_{odpis_CO2laser} = \frac{N_{odpis_CO2/rok}}{t_{prac_hod/rok}}, \quad (4.1)$$

$$N_{odpis_CO2laser} = \frac{N_{odpis_CO2/rok}}{t_{prac_hod/rok}} = \frac{3\,000\,000}{4\,160} = 721,15 \text{ Kč} \cdot h^{-1}$$

kde: $N_{odpis_CO2/rok}$ – roční odpisy CO₂ laseru po dobu pěti let [Kč·rok⁻¹]
 $t_{prac_hod/rok}$ – pracovní hodiny za rok po dvou směnách [hod·rok⁻¹]

- Cena spotřeby energie CO₂ laseru za hodinu:

$$N_{energie_komp+CO2} = N_{energie_komp_CO2} + N_{energie_CO2}, \quad (4.2)$$

$$N_{energie_komp+CO2} = N_{energie_komp_CO2} + N_{energie_CO2} = 6,13 + 390 = 396,13 \text{ Kč} \cdot hod^{-1}$$

- Spotřeba elektrické energie fiber laseru kompresorem:

$$N_{energie_komp_CO2} = \frac{P_{přik_kom} \cdot N_{cena/kWh}}{V_{cel_komp}} \cdot V_{spotř_komp_CO2}, \quad (4.3)$$

$$N_{energie_komp_CO2} = \frac{P_{přik_kom} \cdot N_{cena/kWh}}{V_{cel_komp}} \cdot V_{spotř_komp_CO2} = \frac{13,9 \cdot 5}{102} \cdot 9 = 6,13 \text{ Kč} \cdot hod^{-1}$$

kde: $P_{přik_kom}$ – příkon kompresoru [kW]
 $N_{cena/kWh}$ – cena za kWh [Kč·kWh⁻¹]
 V_{cel_komp} – objem vyprodukovaný kompresorem [m³]
 $V_{spotř_komp_CO2}$ – spotřeba laseru vyprodukovaného objemu vzduchu [m³]

- Spotřeba elektrické energie CO₂ laseru:

$$N_{energie_CO2} = P_{přik_CO2} \cdot N_{cena/kWh}, \quad (4.4)$$

$$N_{energie_CO2} = P_{přik_CO2} \cdot N_{cena/kWh} = 78 \cdot 5 = 390 \text{ Kč} \cdot hod^{-1}$$

kde: $P_{přik_CO2}$ – příkon CO₂ laseru [kW]

- Cena spotřeby plynů u CO₂ laseru za hodinu:

$$\begin{aligned}
 N_{\text{plyn_CO}_2} &= N_{\text{plyn_řezO}_2\text{CO}_2} + N_{\text{plyn_rezonCO}_2} + N_{\text{plyn_rezonN}_2} + \\
 &\quad + N_{\text{plyn_rezonHe}} + N_{\text{plyn_odvetN}_2\text{CO}_2}, \\
 N_{\text{plyn_CO}_2} &= N_{\text{plyn_řezO}_2\text{CO}_2} + N_{\text{plyn_rezonCO}_2} + N_{\text{plyn_rezonN}_2} + \\
 &\quad + N_{\text{plyn_rezonHe}} + N_{\text{plyn_odvetN}_2\text{CO}_2} = 42,6 + 0,06 + 0,49 + \\
 &\quad + 16,67 + 33,6 = 93,42 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

- Cena spotřeby řezného plynu O₂ (CO₂ laser):

$$\begin{aligned}
 N_{\text{plyn_řezO}_2\text{CO}_2} &= V_{\text{spotřCO}_2\text{O}_2} \cdot N_{\text{cena_O}_2/\text{kubik}}, \\
 N_{\text{plyn_řezO}_2\text{CO}_2} &= V_{\text{spotřCO}_2\text{O}_2} \cdot N_{\text{cena_O}_2/\text{kubik}} = 1,5 \cdot 28,4 = \\
 &= 42,6 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

kde: $V_{\text{spotřCO}_2\text{O}_2}$ – spotřeba objemu plynu laserem za hodinu [$\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$]
 $N_{\text{cena_O}_2/\text{kubik}}$ – cena O₂ za kubík [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$]

- Cena spotřeby plynu CO₂ za hodinu (rezonátor):

$$\begin{aligned}
 N_{\text{plyn_rezonCO}_2} &= V_{\text{spotřCO}_2\text{CO}_2} \cdot N_{\text{cena_CO}_2/\text{kubik}}, \\
 N_{\text{plyn_rezonCO}_2} &= V_{\text{spotřCO}_2\text{CO}_2} \cdot N_{\text{cena_CO}_2/\text{kubik}} = 0,0011 \cdot 57,9 = \\
 &= 0,06 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

kde: $V_{\text{spotřCO}_2\text{CO}_2}$ – spotřeba objemu plynu rezonátorem za hodinu [$\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$]
 $N_{\text{cena_CO}_2/\text{kubik}}$ – cena CO₂ za kubík [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$]

- Cena spotřeby plynu N₂ za hodinu (rezonátor):

$$\begin{aligned}
 N_{\text{plyn_rezonN}_2} &= V_{\text{spotřCO}_2\text{N}_2} \cdot N_{\text{cena_N}_2\text{láhev}/\text{kubik}}, \\
 N_{\text{plyn_rezonN}_2} &= V_{\text{spotřCO}_2\text{N}_2} \cdot N_{\text{cena_N}_2\text{láhev}/\text{kubik}} = 0,0058 \cdot 84,5 = \\
 &= \text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

kde: $V_{\text{spotřCO}_2\text{N}_2}$ – spotřeba objemu plynu rezonátorem za hodinu [$\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$]
 $N_{\text{cena_N}_2\text{láhev}/\text{kubik}}$ – cena N₂ v láhvi za kubík [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$]

- Cena spotřeby plynu He za hodinu (rezonátor):

$$\begin{aligned}
 N_{\text{plyn_rezonHe}} &= V_{\text{spotřCO}_2\text{He}} \cdot N_{\text{cena_He}/\text{kubik}}, \\
 N_{\text{plyn_rezonHe}} &= V_{\text{spotřCO}_2\text{He}} \cdot N_{\text{cena_He}/\text{kubik}} = 0,0131 \cdot 1\,272,3 = \\
 &= 16,67 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

kde: $V_{\text{spotřCO}_2\text{He}}$ – spotřeba objemu plynu rezonátorem za hodinu [$\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$]
 $N_{\text{cena_He}/\text{kubik}}$ – cena He za kubík [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$]

- cena spotřeby plynu N₂ za hodinu (odvětrávání paprsku dusíkem u CO₂ laseru – vytváří přetlak ve světlovodu k zredukování procenta prachových částic):

$$\begin{aligned}
 N_{\text{plyn_odvetN}_2\text{CO}_2} &= V_{\text{spotřCO}_2\text{N}_2} \cdot N_{\text{cena_N}_2\text{tekutý}/\text{kubik}}, \\
 N_{\text{plyn_odvetN}_2\text{CO}_2} &= V_{\text{spotřCO}_2\text{N}_2} \cdot N_{\text{cena_N}_2\text{tekutý}/\text{kubik}} = 3 \cdot 11,2 = \\
 &= 33,6 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

kde: $V_{\text{spotřCO}_2\text{N}_2}$ – spotřeba objemu plynu na odvětrávání paprsku za hodinu [$\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$]
 $N_{\text{cena_N}_2\text{tekutý}/\text{kubik}}$ – cena tekutého N₂ za kubík [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$]

- Cena předpokládaných oprav a náhradních dílů za hodinu:

$$\begin{aligned}
 N_{\text{oprav+dílyCO}_2} &= N_{\text{oprav_CO}_2} + N_{\text{díly_CO}_2}, \\
 N_{\text{oprav+dílyCO}_2} &= N_{\text{oprav_CO}_2} + N_{\text{díly_CO}_2} = 12,02 + 4,81 = \\
 &= 16,83 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

- Cena předpokládaných nákladů na opravy za hodinu:

$$N_{oprav_CO2} = t_{prac_hod/rok} \cdot N_{nákl_oprav_CO2}, \quad (4.12)$$

$$N_{oprav_CO2} = t_{prac_hod/rok} \cdot N_{nákl_oprav_CO2} = 4\,160 \cdot 50\,000 = \\ = 12,02 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$$

kde: $N_{nákl_oprav_CO2}$ – předpokládané náklady na opravy za rok [Kč·rok⁻¹]

- Cena předpokládaných nákladů na díly za rok:

$$N_{díly_CO2} = t_{prac_hod/rok} \cdot N_{nákl_díly_CO2}, \quad (4.13)$$

$$N_{díly_CO2} = t_{prac_hod/rok} \cdot N_{nákl_díly_CO2} = 4\,160 \cdot 20\,000 = \\ = 12,02 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$$

kde: $N_{nákl_díly_CO2}$ – předpokládané náklady na díly za rok [Kč·rok⁻¹]

- Hodinová mzda operátora CNC laseru:

$$N_{mzda} = 350 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1} \quad (4.14)$$

- Hodinová sazba CO₂ laseru:

$$N_{sazba_CO2} = N_{odpis_CO2laser} + N_{energie_komp+CO2} + N_{plyn_CO2} + \\ + N_{oprav+dilyCO2} + N_{mzda}, \quad (4.15)$$

$$N_{sazba_CO2} = N_{odpis_CO2laser} + N_{energie_komp+CO2} + N_{plyn_CO2} + \\ + N_{oprav+dilyCO2} + N_{mzda} = 721,15 + 6,13 + 390 + 93,42 + \\ + 16,83 + 350 = 1\,577,53 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$$

- Cena za metr řezu u CO₂ laseru:

$$N_{cena_metr_CO2} = \frac{N_{sazba_CO2}}{v_{CO2}} \cdot 60, \quad (4.16)$$

$$N_{cena_metr_CO2} = \frac{N_{sazba_CO2}}{v_{CO2} \cdot 60} = \frac{1\,577,53}{2 \cdot 60} = 13,15 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-1}$$

kde: v_{CO2} – řezná rychlost CO₂ laseru [m·min⁻¹]

U fiber laserového dělení se dá předpokládat, že bude levnější variantou dělení než CO₂ laserové dělení a to především díky vysoké účinnosti fiber laseru, která se pohybuje okolo 40 %. Obecně platí, že díky vedení paprsku optickými kabely nejsou vyžadovány velké nároky na chlazení jako u CO₂ laseru, tomu odpovídá i velice nízký příkon stroje (viz tab. 9). Je také předpokládáno, že cena fiber laseru je nižší než pořizovací cena CO₂ laseru, ovšem tím, že byl experiment prováděn na 6 kW fiber laseru a 4 kW CO₂ laseru, je v tomto výpočtu uvažována teoreticky stejná pořizovací cena obou strojů.

Hodinová sazba a cena za metr řezu u fiber laserového dělení prováděné na 10 mm vysokopevnostní oceli IMEX 700 je následující: [4; 9]

- Odpisy fiber laseru za hodinu:

$$N_{odpis_fiberlaser} = \frac{N_{odpis_fiber/rok}}{t_{prac_hod/rok}}, \quad (4.17)$$

$$N_{odpis_fiberlaser} = \frac{N_{odpis_fiber/rok}}{t_{prac_hod/rok}} = \frac{3\,000\,000}{4\,160} = 721,15 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$$

kde: $N_{odpis_fiber/rok}$ – roční odpisy fiber laseru po dobu pěti let [Kč·rok⁻¹]

- Cena spotřeby energie fiber laseru za hodinu:

$$N_{energie_komp+fiber} = N_{energie_komp_fiber} + N_{energie_fiber}, \quad (4.18)$$

$$N_{energie_komp+fiber} = N_{energie_komp_fiber} + N_{energie_fiber} = 4,77 + 75 = \\ = 79,77 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$$

- Spotřeba elektrické energie fiber laseru kompresorem:

$$N_{\text{energie_komp_fiber}} = \frac{P_{\text{přik_kom}} \cdot N_{\text{cena/kWh}}}{V_{\text{cel_komp}}} \cdot V_{\text{spotř_komp_fiber}}, \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{energie_komp_fiber}} &= \frac{P_{\text{přik_kom}} \cdot N_{\text{cena/kWh}}}{V_{\text{cel_komp}}} \cdot V_{\text{spotř_komp_fiber}} = \\ &= \frac{13,9 \cdot 5}{102} \cdot 7 = 4,77 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1} \end{aligned}$$

- Spotřeba elektrické energie fiber laseru:

$$N_{\text{energie_fiber}} = P_{\text{přik_fiber}} \cdot N_{\text{cena/kWh}}, \quad (4.20)$$

$$N_{\text{energie_fiber}} = P_{\text{přik_fiber}} \cdot N_{\text{cena/kWh}} = 15 \cdot 5 = 75 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$$

kde: $N_{\text{přik_fiber}}$ – příkon fiber laseru [kW]

- Cena spotřeby plynů u fiber laseru za hodinu:

$$N_{\text{plyn_fiber}} = N_{\text{plyn_řezO2_fiber}} = V_{\text{spotř_fiber_O2}} \cdot N_{\text{cena_O2/kubik}}, \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{plyn_fiber}} &= N_{\text{plyn_řezO2_fiber}} = V_{\text{spotř_fiber_O2}} \cdot N_{\text{cena_O2/kubik}} = \\ &= 1,7 \cdot 28,4 = 48,28 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1} \end{aligned}$$

kde: $N_{\text{plyn_řezO2_fiber}}$ – cena spotřeby řezného plynu O₂ fiber laserem [Kč·hod⁻¹]

$V_{\text{spotř_fiber_O2}}$ – spotřeba objemu plynu laserem za hodinu [m³·hod⁻¹]

- Cena předpokládaných oprav a náhradních dílů za hodinu:

$$N_{\text{oprav+dily_fiber}} = N_{\text{oprav_fiber}} + N_{\text{dily_fiber}}, \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{oprav+dily_fiber}} &= N_{\text{oprav_fiber}} + N_{\text{dily_fiber}} = 16,83 + 19,23 = \\ &= 36,06 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1} \end{aligned}$$

- Cena předpokládaných nákladů na opravy za hodinu:

$$N_{\text{oprav_fiber}} = t_{\text{prac_hod/rok}} \cdot N_{\text{nákl_oprav_fiber}}, \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{oprav_fiber}} &= t_{\text{prac_hod/rok}} \cdot N_{\text{nákl_oprav_fiber}} = 4\,160 \cdot 70\,000 = \\ &= 16,83 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1} \end{aligned}$$

kde: $N_{\text{nákl_oprav_fiber}}$ – předpokládané náklady na opravy za rok [Kč·rok⁻¹]

- Cena předpokládaných nákladů na díly za rok:

$$N_{\text{dily_fiber}} = t_{\text{prac_hod/rok}} \cdot N_{\text{nákl_dily_fiber}}, \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{dily_fiber}} &= t_{\text{prac_hod/rok}} \cdot N_{\text{nákl_dily_fiber}} = 4\,160 \cdot 80\,000 = \\ &= 19,23 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1} \end{aligned}$$

kde: $N_{\text{nákl_dily_fiber}}$ – předpokládané náklady na díly za rok [Kč·rok⁻¹]

- Hodinová sazba fiber laseru:

$$\begin{aligned} N_{\text{sazba_fiber}} &= N_{\text{odpis_fiberlaser}} + N_{\text{energie_komp+fiber}} + N_{\text{plyn_fiber}} + \\ &+ N_{\text{oprav+dily_fiber}} + N_{\text{mzda}}, \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{sazba_fiber}} &= N_{\text{odpis_fiberlaser}} + N_{\text{energie_komp+fiber}} + N_{\text{plyn_fiber}} + \\ &+ N_{\text{oprav+dily_fiber}} + N_{\text{mzda}} = 721,15 + 79,77 + 48,28 + \\ &+ 36,06 + 350 = 1\,235,26 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1} \end{aligned}$$

- Cena za metr řezu u fiber laseru:

$$N_{\text{cena_metr_fiber}} = \frac{N_{\text{sazba_fiber}}}{v_{\text{fiber}}} \cdot 60, \quad (4.27)$$

$$N_{\text{cena_metr_fiber}} = \frac{N_{\text{sazba_fiber}}}{v_{\text{fiber}} \cdot 60} = \frac{1\,235,26}{2,38 \cdot 60} = 8,65 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-1}$$

kde: v_{fiber} – řezná rychlost fiber laseru [m·min⁻¹]

Z výsledných hodnot je patrné, že nejlevnější možnou variantou dělení 10 mm vysokopevnostní oceli IMEX 700 je fiber laserové dělení, které za hodinu dělení je levnější zhruba o 342,3 Kč a na metr řezu o zhruba 4,5 Kč v porovnání s CO₂ laserovým dělením (viz tab. 9). Co se týče cen dělení u plazmy a kyslíku, dá se předpokládat výrazně nižší hodinová sazba, ovšem na úkor kvality nejsou tyto technologie vhodné k dělení zkoumané oceli. V tomto technicko-ekonomickém zhodnocení se ovšem plazmové a kyslíkové dělení neuvažovalo a to z důvodu nevěrohodných vstupních parametrů u použitých zařízení.

Tab. 9 Srovnání laserových metod dělení z hlediska užitých parametrů a ekonomiky [4].

	CO ₂ laser – TRUMPF TruLaser 3040 (4 kW)	Fiber laser – TRUMPF TruLaser 3030 fiber (6 kW)
Pořizovací cena [Kč]	15 000 000	15 000 000
Užitý příkon při dělení [kW]	78	15
Užitý výkon při dělení [kW]	3,6	6
Řezná rychlost [m·min ⁻¹]	2	2,38
Hodinová sazba stroje [Kč·hod ⁻¹]	1 577,5	1 235,3
Cena za metr řezu [Kč·m ⁻¹]	13,2	8,7

ZÁVĚR

V této diplomové práci, která je rozdělena do dvou částí – rešeršní a experimentální, bylo hlavní náplní experimentu na nízkouhlikové, konstrukční, vysokopevnostní oceli s komerčním názvem IMEX 700 o tloušťce 10 mm zkoumat jakost řezných hran u vzorků, které byly děleny plynovým CO₂ a pevnolátkovým fiber laserem. Laserové technologie dělení spadají do normy ČSN EN ISO 9013, která je určena pro klasifikaci tepelného dělení, geometrických požadavků na díly a úchytky jakosti řezů právě pro laser, nebo také plazmu a plamen. A právě s plazmovým a kyslíkovým dělením se laserová technologie porovnávala a to jak z hlediska jakosti (za použití citované normy), tak i z hlediska ekonomických nákladů.

Na CNC řízeném, portálovém CO₂ a fiber laseru se vyřezalo dvanáct vzorků 100 x 30, kdy k následnému měření se vzal pouze první a dvanáctý kus, jelikož první kus v porovnání s dvanáctým kusem je vždy nedokonalý. Poté se po jednom vzorku jedním lineárně vedeným řezem vyřezaly vzorky mechanicky vedenou vzduchovou plazmou a kyslíkovým hořákem. Tyto vzorky se vzaly k měření drsnosti řezných hran, kdy se za pomoci kontaktního profilometru a normy ČSN EN ISO 9013 provedlo měření. Vyhodnocené parametry Ra a Rz se poté vynesly do tabulky, spočítaly se aritmetické průměry a směrodatné odchylky. Poté se do normou daného grafu rozdělený do jednotlivých jakostních tříd závislosti Rz na tloušťce materiálu, který uvádí již zmíněná norma, vynesly naměřené zprůměrované hodnoty parametru Rz u dvanáctých vzorků po laserovém dělení a naměřené hodnoty u řezů po plazmovém a kyslíkovém dělení. Do nejlepší jakostní třídy spadá řez po fiber laserovém dělení, do druhé řez po CO₂ a plazmovém dělení a jako nejhorší z užitých metod dělení vyšlo kyslíkové dělení, které dle normy spadá do třetí jakostní třídy.

Dále se za pomoci normy zkoumala kolmost řezu, kdy norma definuje graf rozdělený do jednotlivých jakostních tříd závislosti úchytky kolmosti na tloušťce materiálu. V tomto případě do nejlepší jakostní třídy spadá fiber a CO₂ laserové dělení a do druhé jakostní třídy pak kyslíkové a plazmové dělení, které vyšlo ze všech metod jako nejhorší.

V poslední části se zkoumala tepelně ovlivněná oblast u vzorků a s tím i spjatá tvrdost. Na metalografickém vyleštěném výbrusu, který byl proveden řezem kolmo na osu řezu, se staticko-plastickou mikrotvrdostní Vickersovou zkouškou provedlo měření patnácti vpichů při zatížení indentoru o síle 1,961 N kolmo na plochu řezu směrem z tepelně ovlivněné oblasti do základního materiálu, v krocích 0,2 mm. Z těchto zkoušek se zjistilo a porovnávalo s makro a mikrostrukturními pořízenými snímky ze světelného optického mikroskopu a také za pomoci ARA diagramu, že nejmenší, ale také nejtvrdší tepelně ovlivněná oblast je obecně u laserové technologie, která dosahuje zhruba 0,3 mm. Největší šířka byla pak změřena u kyslíkového dělení, v oblasti vstupu paprsku do materiálu zhruba 4,71 mm. Vysoké vnesené teplo do základního materiálu razantně ovlivnilo nejen šířku, ale i vzniklé struktury v závislosti na tvrdosti materiálu v této oblasti. O něco lépe pak vyšla šířka tepelně ovlivněné oblasti u vzorků po plazmovém dělení, která svojí šířkou 3,9 mm může konkurovat pouze kyslíkovému dělení.

Z technicko-ekonomického zhodnocení vyplývá, že hodinová sazba fiber laserového dělení je o 342,3 Kč a metr řezu o zhruba 4,5 Kč levnější a hlavně rychlejší volba než CO₂ laser a tudíž i z výsledných hodnot experimentu se fiber laserové dělení jeví jako nejlepší možná volba pro dělení vysokopevnostní oceli IMEX 700 tloušťky 10 mm.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KREJČÍŘÍK, Marek. *Srovnání oxidačního a tavného laserového dělení materiálu DC01*. Brno, 2021. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=224966. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
 2. BENKO, B., FODEREK, P., KOSECEK, M., BIELAK, R. *Laserové technologie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9
 3. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-09-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/>
 4. *TRUMPF* [online]. [cit. 2022-09-05]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/
 5. ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*. 2019.
 6. Imex - High Strength Steels. *Abraservice* [online]. 2023 [cit. 2022-09-05]. Dostupné z: <https://www.abraservice.com/en/materials/high-strength-steel/imex>
 7. ČSN EN ISO 10025-6. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 6: Technické dodací podmínky pro ploché výrobky z ocelí s vyšší mezí kluzu v zušlechťeném stavu*. 2022.
 8. ČSN EN 10027-1. *Systémy označování ocelí – Část 1: Stavba značek oceli*. 2017.
 9. *LaserCore* [online]. 2022 [cit. 2022-09-05]. Dostupné z: www.lasercore.cz
 10. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro mezinárodní/eurospké svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Brno: Odbor svařování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2016, 272 stran : ilustrace.
 11. The Properties of Laser Light. *Nagwa* [online]. [cit. 2022-09-05]. Dostupné z: <https://www.nagwa.com/en/explainers/570180938352/>
 12. POKORÁK, Milan. *Optimalizace laserového tavného dělení povlakovaných hliníkových plechů*. Brno, 2014. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84331. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
 13. Historie laseru. *LaserArt* [online]. [cit. 2022-09-05]. Dostupné z: http://www.laserart.wbs.cz/Historie_laseru.html
 14. Charles Hard Townes. *Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR* [online]. [cit. 2022-09-05]. Dostupné z: <https://www.ufe.cz/cs/charles-hard-townes>
 15. NAROVEC, David. *Analýza povrchu po řezání laserem*. Brno, 2015. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102511. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
 16. VRBOVÁ, Miroslava. *Lasery a moderní optika*. Praha: Prometheus, 1994. ISBN 80-85849-56-9.
 17. *Wikipedia* [online]. 2022 [cit. 2022-09-05]. Dostupné z: <https://www.wikipedia.org/>
 18. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. *LAO Lasery a optika* [online]. [cit. 2022-09-05]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
-

-
19. Dělení materiálů laserovým paprskem je stále na vzestupu zájmu. *Konstrukce – odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. 2020 [cit. 2022-09-06]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/deleni-materialu-laserovym-paprskem-je-stale-na-vzestupu-zajmu-591>
 20. DOČEKAL, Miroslav. *Posouzení vlastností řezné hrany ocelového plechu při tavném a oxidační řezání pevnolátkovým laserem*. Brno, 2015. Dostupné také z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/40505/final-thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
 21. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky*. In: *Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. Brno 2022 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
 22. HUNG, Tsung-Pin, Hao-En SHI a Jao-Hwa KUANG. *Temperature Modeling of AISI 1045 Steel during Surface Hardening Processes*. 2018, 21. Dostupné z: doi:10.3390/ma11101815
 23. *FJFI ČVUT v Praze* [online]. [cit. 2022-09-09]. Dostupné z: <https://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/>
 24. Technologické lasery. *CWS ANB* [online]. [cit. 2022-09-09]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
 25. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. 2010. vyd. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, o.p.s., 2010. 1, 1. ISBN 978-80-87-240-65-6.
 26. MEGABLOG. *Hlavní typy laserů používaných v průmyslu* [online]. [cit. 2023-12-17]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
 27. MRŇA, Libor. *Svařování laserem*. In: *Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. Brno 2022 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
 28. MRŇA, Libor. *Speciální technologie svařování*. In: *Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. Brno 2022 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
 29. SIGMUND, Marian. *DT a NDT metody zkoušení svarů* [prezentace]. Brno 2021. Prezentace poskytnuta vyučujícím
 30. How Does Laser Drilling Work in PCBS. *Sierra Circuits* [online]. 2022 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.protoexpress.com/blog/how-does-laser-drilling-work-pcbs/>
 31. MRŇA, Libor. *Povrchové kalení a navařování laserem*. In: *Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. Brno 2022 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
 32. KUBÍČEK, Jaroslav. *Renovace*. In: *Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. Brno 2022 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
 33. MRŇA, Libor. *Nový stroj umí obrábět laserem zastudena s mikrometrovou přesností*. *Akademie věd České republiky* [online]. 20. 04. 2021 [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: <https://www.avcr.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/Novy-stroj-umi-obrabet-lasem-zastudena-s-mikrometrovou-presnosti/>
 34. LASCAM - Laserové a optické technologie pro průmysl [online]. [cit. 2023-12-17]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz>
-

-
35. JEDLIČKOVÁ, Veronika. *Využití laserové skenovací hlavy pro povrchové kalení*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
 36. MRŇA, Libor. *Dělení materiálů laserem*. Ústav přístrojové techniky AV ČR.
 37. Laser Cutting. *Ionix* [online]. [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: <https://www.ionix.fi/en/technologies/laser-processing/laser-cutting/>
 38. MRŇA, Libor. Řezání laserem. In: *Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. Brno 2022 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
 39. MRŇA, Libor. Svařování svazkem elektronů. In: *Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. Brno 2022 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
 40. TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvarovania*. Bratislava: ALFA, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1989. ISBN 80-05-00097-9.
 41. MUTŇANSKÝ, Vladimír. *Rezanie kyslíkom*. Bratislava: SVTL, 1961, 297 s.
 42. MRŇA, Libor. Dělení a svařování plazmou. In: *Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. Brno 2022 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
 43. Guide to Plasma Cutting. *Jasic* [online]. 2023 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.jasic.co.uk/post/guide-to-plasma-cutting>
 44. JANKOVÝCH, Robert. *Metrologie textury povrchu I*. [prezentace]. Brno 2021. Prezentace poskytnuta vyučujícím
 45. ČSN EN ISO 21920-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Struktura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 2022.
 46. PLACATA, Jan. *Předepisování struktury povrchu* [prezentace]. 2012. Volně dostupná prezentace
 47. Měření drsnosti. M&B Calibr [online]. [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
 48. Měření drsnosti povrchu. *ELUC - Elektronická učebnice* [online]. [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>
 49. JULIŠ, Martin. *Hodnocení tvrdosti materiálu* [prezentace]. Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství, 2022. Prezentace poskytnuta vyučujícím
 50. MOLÍKOVÁ, Eva. Zkoušení materiálů a výrobků [online]. [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/index.html>
 51. JULIŠ, Martin. *Nízkouhlíkové konstrukční oceli* [prezentace]. Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství, 2022. Prezentace poskytnuta vyučujícím
 52. KEELER, Stuart a Menachem KIMCHI. Advanced High-Strength Steels. *WorldAutoSteel*. 2014.
 53. *ESAB* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://esab.com/cz/eur_cs/
 54. *ZEISS* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/corporate/home.html>
 55. *Struers* [online]. [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.struers.com/en#>
 56. *Spectrographic* [online]. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://spectrographic.co.uk/>
 57. *QATM - Quality Assured* [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.qatm.com/>
 58. BŁACHA, S., M. WĘGŁOWSKI, S. DYMEK a M. KOPUŚCIAŃSKI. *Microstructural characterization and mechanical properties of electron beam welded joint of high strength steel grade S690QL*. 8. Dostupné z: doi:10.1515/amm-2016-0198
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
a	tloušťka řezu	[mm]
A	tažnost	[%]
Δa	zmenšení tloušťky řezu	[mm]
c	směr posuvu	[-]
E_1	dolní energetická hladina	[J]
E_2	horní energetická hladina	[J]
h	Planckova konstanta	[J·s]
k	kluzová rýha	[mm]
ln	vyhodnocovaná délka	[μm]
lr	základní délka	[μm]
lt	celková délka	[μm]
m	šířka skluzové rýhy	[mm]
n	skluz	[mm]
N	cena	[Kč]
o	hloubka drážky	[mm]
$P_{\text{přík}}$	příkon	[W]
$P_{\text{výk}}$	výkon	[W]
R_a	průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
R_c	průměrná výška prvků profilu	[μm]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
R_p	největší výška výstupního profilu	[μm]
R_v	největší hloubka prohlubně profilu	[μm]
R_z	největší výška profilu	[μm]
R_{z5}	průměrná výška prvků profilu	[μm]
s_x	směrodatná odchylka	[μm]
t	čas	[s]
T	teplota	[°C]
u	úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu	[mm]
v	rychlost	[m·min ⁻¹]
V	objem	[m ³]
\bar{x}	aritmetický průměr	[-]
X_s	šířka prvku profilu	[μm]
Z_p	výška výstupku profilu	[μm]
Z_t	výška prvku profilu	[μm]
Z_v	hloubka prohlubně profilu	[μm]
λ	vlnová délka	[μm]
ν	frekvence záření	[Hz]

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový list IMEX 700 [6]
 - Příloha 2 Řezací lístek fibre laseru [4]
 - Příloha 3 Řezací lístek CO₂ laseru [4]
 - Příloha 4 Technické údaje CO₂ a fibre laseru [4]
 - Příloha 5 Kalibrační certifikát dotykového drsnoměru Handysurf+ 35
 - Příloha 6 Přehled naměřených drsností u daných technologií
 - Příloha 7 Přehled naměřených mikrotvrdomostí u daných technologií
 - Příloha 8 Sbíрка doporučených parametrů pro CO₂ laser TRUMPF TruLaser 3040 [4]
 - Příloha 9 Sbíрка doporučených parametrů pro fiber laser TRUMPF TruLaser 3030 fiber
-

ABRASERVICE
UK

IMEX 700

HIGH YIELD STRENGTH STEEL QUENCHED
AND TEMPERED

— Plates, obtained from quarto mill.

— International standard:
EN 10025-6: 2004-11 (S 690 QL).

Chemical composition

C	Si	Mn	Mo	Nb	Ni	Ti	S	P	V	N	B	Cr	Cu
≤ 0.20	≤ 0.80	≤ 1.7	≤ 0.70	≤ 0.06	≤ 2.00	≤ 0.05	≤ 0.01	≤ 0.02	≤ 0.12	≤ 0.015	≤ 0.005	≤ 1.50	≤ 0.50

Mechanical properties in delivery condition

Thickness (mm)	Ys (MPa)	UTS (MPa)	E (%)
≤ 50	690	770 - 940	14
50 - 100	650	760 - 930	14
100 - 150	630	710 - 900	14

— Impact tests (according to EN 10045-1):

Testing	Minimum impact toughness values (J)	
-40 °C	Longitudinal	Transversal
	30	27

— Fields of application:

Mining, quarrying, construction and earthmoving,
material handling...

— Delivery condition:

Water quenched and tempered.

— Thickness range:

8 - 120 mm.

— Size range:

- Width 1000 - 3000 mm;
- Length up to 8000 mm.

Processing information

— **Cold bending:**

The following table is valid for bending angles up to 90°

(th = plate thickness):

	Internal minimum radius	Die opening minimum
Transversal	3 x th	10 x th
Longitudinal	4 x th	12 x th

— **Hot forming:**

The grade is not suitable for hot forming.

— **Flame cutting:**

All conventional oxy-gas or plasma methods can be used.

Pre-heating temperatures according to thickness.

General note

— If further informations are required, please request a copy of our technical guide.

Contact

A. Arley Road, Saltley, Birmingham B8 1BB, United Kingdom

T. +44 121 326 3100

F. +44 121 326 3105

E. a.uk@abraservice.com

W. www.abraservice.com/uk/

TRUMPF



Serizovací plán:

Dipl_Krejc_ST100

03.02.2023

Pracoviště:	Laser3030_L81_6kW	Pož. termín dokonč.: 31.12.5000 23:59:00
Celková doba	00:02:28 [h:min:s]	Prorez: 97 %
Pocet dílu:	18	Pocet tabulí: 1
Poznámka k úloze:		Vytvoril: matousubr

Laserové technologické tabulky						
Císlo tabulky	Rezná spára	Ohnisk. vzdálenost očky	Prumer trysky	Max. výkon laseru	Nastavená míra	Plyn
ST100MD0-O2B0-30-2	0,86	7,90	EAA12	6000	23,50	1

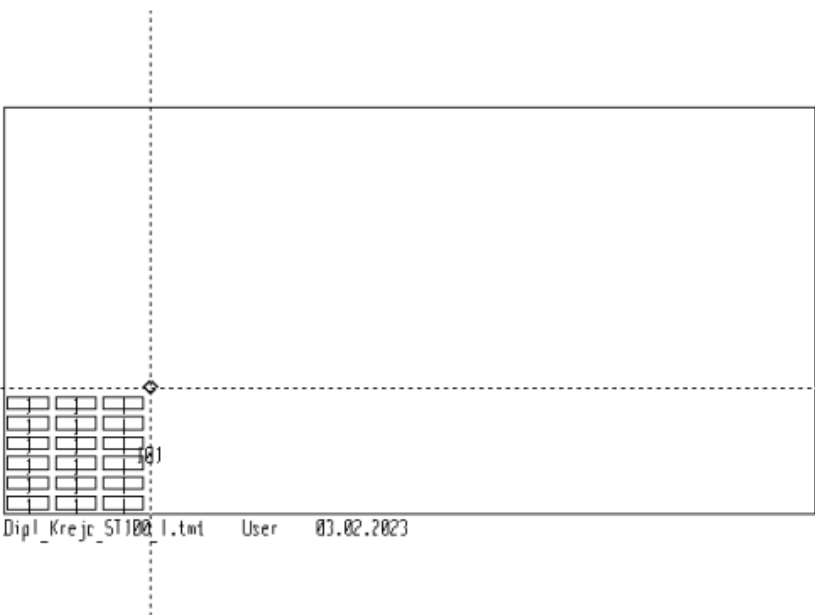

Druh plynu: 1 = kyslík, 2 = dusík, 4 = stlačený vzduch

Technologické tabulky			
Císlo	Způsob zapichování	Způsob rezní	Druh brysu
ST100MD0-O2B0-30-2	KOMPLETNI	NORMALNI	VELKY
ST100MD0-O2B0-30-2	KOMPLETNI	REDUKOVANE	VELKY

NC programy						
Hlavní program	Smýdla	Výrobní balík - surové tabule plechu Rozměry:	C. řazba	Výrobní balík - hmotnost	Výrobní balík - prorez	Doba trvání
Dipl_Krejc_ST100_1	1	ST0M1000----2000x1000 (1.0038) 2000,00 x 1000,00 x 10,00 mm		157,00 kg	97,30 %	00:02:28 [h:min:s]

Díly				
#	C. dílu:	GeoFile:	Výrobní zakázka	Ks
1	Mara	Mara.GEO	Dipl_Krejc_ST100_1	18

Informace o dílu/zakázce			
	C. dílu:	Mara	Ks: 18
	Ozn. dílu:	Mara	Hmotnost dílu: 0,24 kg
	C. výkresu:		Výrobní čas dílu: 00:00:07
	GeoFile:	Mara.GEO	Čas obrábění dílu, desetín.: 0,12
	Rozměry:	30,00 x 100,00 mm	Plocha: 0,003000 m ²
	C. zakázky:	OR2490	Délka rezní: 264,71 mm
	Charakt. zakázky:		Poznámka k dílu:
	Zákazník:		Body zapichování: 1
	Verze:		

Výrobní zakázka					
				Výrobní zakázka: Dipl_Krejc_ST100_1	
				Hlavní program: Dipl_Krejc_ST100_1	
				Smyčka: 1	
				Materiál: 1.0038	
				Surový materiál: ST0M1000---	
				Výrobní balík - surová tabule plechu: ST0M1000----2000x1000 ST0M1000----2000x1000	
				Rozměry: 2000,00 x 1000,00 x 10,00 mm	
				Minimální přírez: 360,00 x 310,00 mm	
				Výrobní balík - hmotnost: 157,00 kg	
				Výrobní balík - prorez: 97,30 %	
				Doba trvání: 00:02:28 [h:min:s]	
				Délka rezání: 5079,82 mm	
					
#	C.zakázky:	C.dílu:	GeoFile:	Množství na tabuli:	Ks
1	OR2490	Mara	Mara.GEO	18	18

Výrobní instrukce	
Mikromustky, menitelné na stroji	nenastaveno
Název osazení úložného roštu	Standardní stroj, každý druhý nastaven
Odstup operných bodů na úložném roštu	38 mm
Odstup úložných roštů NEBO odstranované mustky	67 mm
Upřednostnit zpracování	bez
Obrysy naprogramovány s dráhovou korekcí!	



TRUMPF



NASTAVOVACÍ PLAN OBECNÉ UDAJE

Mara Jr.
07.10.2022
TruTops Laser V14.06.00

STROJ:	TruLaser 3040 (L4030S) (MAX.VYKON LASERU 4000 WATT)
SYSTEM RIZENI:	Sin 840D
Firma:	Trumpf
NAZEV ZAKAZKY:	Mara_1
CESTA PROGRAMU NC:	/ Laser/ Mara_Jr/ Mara_1_1.LST
NAZEV PROGRAMU:	Mara_1_1 ()
ID MATERIÁLU (TABULE):	1000S355J2CN (1000S355J2CN)
MATERIAL (TT):	St37-100 (1.0038)
ID zboží na skladě:	
SKLADOVACÍ MÍSTO	
PŘÍREZ:	1000.00 x 310.00 x 10.00 mm
MINIMÁLNÍ PŘÍREZ:	360.51 x 310.00 mm
SMER VÁLCE:	*
HMOTNOST:	24.80 kg
STROJNÍ ČAS	0 : 03 : 30 [h:min:s]
POTREBA PAMETI:	3756 ZNAK
CELKOVÁ DELKA REZU:	5188.05 mm
POČET PROGRAMOVÝCH CYKLU:	1
PROREZ:	82.58 %

VYROBNÍ INSTRUKCE

PLECHOVÝ DORAZ	1
MIKROMŮSTKY, ZMĚNITELNÉ NA STROJI:	nenastaveno
NÁZEV OSAZENÍ OPĚRNÝCH LIŠT:	Standardní stroj, každý druhý nastaven
VZDÁLENOST OPĚRNÝCH BODŮ NA OPĚRNÉ LIŠTĚ	38 mm
VZDÁLENOST OPĚRNÝCH LIŠT:	67 mm
UPŘEDNOSTNIT ZPRACOVÁNÍ:	bez
POZNAMKY:	

LASER-TECHNOLOGICKE TABULKY

CISLO TABULKY	MEZERA REZU	OHNISKOVA VZDALENOST COCKY	PRUMER TRYSKY	MAX. VYKON LASERU	SERIZOVACI ROZMER	PLYN
T2D-5109	0.50	7.50	1.2	4000	0.50	1

Druh plynu: 1 = kyslík, 2 = dusík, 3 = zákazník, 4 = stlačený vzduch

TECHNOLOGICKE TABULKY

CISLO	DRUH VPICHOVANI	DRUH REZANI	DRUH OBRYSU
T2D-5109	KOMPLETNI	NORMALNI	VELKY


INFORMACE O JEDNOTLIVÝCH DÍLECH

CISLO DILU:	CISLO VYKRESU:	NAZEV GEOM:SOUBORU	POČET:
1	NOID_1	/ DIALOG_TOPS/ pracovni/ hala/ Mara.GEO	18

NAZEV DESKY: /Laser/Mara_Jr/Mara_1_1.taf

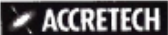
INFORMACE O JEDNOTLIVÝCH DÍLECH		
	CISLO DILU:	1
	CISLO VYKRESU:	NOID_1
	NAZEV VYKRESU:	
	JMENO ZAKAZNIKA:	
	POCET:	18
	ROZMERY:	30.000 x 100.000 mm
	PLOCHA:	3000.00 mm ²
	NAZEV PRACOVNIHO PREDPISU:	KT2D-5109-6
	CISLO PODPROGRAMU:	SP1Mara_1_1
	DOBA ZPRACOVANI:	0.17 min
	REZNA DELKA:	270.114 mm
	HMOTNOST:	0.240 kg
	POCET VPICHOVACICH BODU:	1
	DOBA ZAPICHOVANI:	2.20 s
	NAZEV GEOM:SOUBORU	/ DIALOG_TOPS/ pracovni/ hala/ Mara.GEO


1	1	1
1	1	1
1	1	1
1	1	1
1	1	1
1	1	1



/Laser/Mara_Jr/Mara_1_1.taf
Mara Jr.
07.10.2022

		TRUMPF TruLaser 3040 TRUFLOW 4000	TRUMPF TruLaser 3030 fiber TRUDISK 6001
Vlnová délka [μm]		10,6	1,03
Max. výkon [W]		4000	6000
Průměrný příkon [W]		31000	15000
Délka [mm]		12000	9229
Šířka [mm]		5300	6145
Výška [mm]		2200	2200
Hmotnost stroje [kg]		15 000	11700
Max. rychlost [m/min]		140	170
Osa X [mm]		4000	3000
Osa Y [mm]		2000	1500
Osa Z [mm]		116	116
Maximální tloušťka plechu [mm]	Konstrukční ocel	20	32
	Nerezová ocel	15	25
	Hliník	10	25
	Měď	-	10
	Mosaz	-	10
Jiné nabízené výkony stroje [W]		3200, 4000, 5000, 6000	4000, 6000, 8000, 10000, 12000, 24000

		Certificate No. : <u>21-KF05175FV</u>				
		Control Number : <u>A012289001 #1</u>				
<u>INSPECTION CERTIFICATE</u>		Date : <u>June 21,2021</u>				
Customer : <u>ACCRETECH (EUROPE) GMBH</u>						
Equipment Name : <u>Surface Texture Measuring Instrument</u>						
Type : <u>HANDYSURF+35</u>						
Quantity : <u>1</u>						
Serial Number : <u>KF05175FV</u>						
Calibration Date : <u>June 21,2021</u>						
A. ACCURACY INSPECTION						
No	Item	Tolerance	Result		Note	
1	Tracing Driver	Straightness	Within Pt: 0.5 μm	0.084 μm	OK	Note 1.
2		Vibration	Within Ra: 0.02 μm	0.003 μm	OK	Note 2.
3	Pickup	Front Travel	Below -163.5 μm	-273.7 μm	OK	
4		Measure Specimen (Small Surface)	Within $\pm 0.04\mu\text{m}$ From Label Value	-0.03 μm	OK	Note 3.
Note 1. Tracing Length 16.0 mm						
Note 2. Cutoff Length 0.25 mm						
Note 3. Measure Shipping Specimen						
Note 4. Accuracy is guaranteed under the 20 °C temperature.						

		Certificate No. : 21-KF05175FV	
INSPECTION CERTIFICATE		Control Number : A012289001 #1	
Type : HANDYSURF+35		Date : June 21,2021	
B. FUNCTIONAL INSPECTION			
No	Item	Method	Judgement
1	Mechanical Function	Inspect for smooth movement and function	OK
2	Electric Function	Inspect for display and operation switch	OK
3	Data Processor Function	Inspect for operation and software	OK
4	Safety Function	Inspect for auto stop and other safety functions	OK
5	Fixture Function	Inspect for attachment	OK
<p>Certified by : <u>M. Enomoto</u> Measurement made by : <u>K. Sato</u></p> <p>TOKYO SEIMITSU CO., LTD. Metrology Company, Quality Assurance Division 4-2, Higashinakanuki-machi, Tsuchiura-city, Ibaraki, Japan Tel: 81(Japan)-29-831-1234 Fax: 81(Japan)-29-831-8051</p>			



INSPECTION CERTIFICATE

Certificate No. : 21-609946159DV

Control Number : A012289001 #1

Date : June 21,2021

Customer : ACCRETECH (EUROPE) GMBH

Equipment Name : ROUGHNESS SPECIMEN

Type : E-MC-S24D

Quantity : 1

Serial Number : 609946159DV

Calibration Date : June 21,2021

No	Item	Criteria	No	Result		Note
1	Ra Stylus check surface	Deviation Within Average $\pm 5\%$	1	0.39 μm	15.4 μin	OK
			2	0.40 μm	15.7 μin	
			3	0.40 μm	15.7 μin	
			4	0.40 μm	15.7 μin	
			5	0.40 μm	15.7 μin	
			Average	0.40 μm	15.7 μin	
			Deviation maximum	0.00 μm	0.1 μin	
			minimum	-0.01 μm	-0.3 μin	
2	Ra Calibration surface	Deviation Within Average $\pm 5\%$	6	3.17 μm	124.8 μin	OK
			7	3.18 μm	125.2 μin	
			8	3.18 μm	125.2 μin	
			9	3.17 μm	124.8 μin	
			10	3.19 μm	125.6 μin	
			Average	3.18 μm	125.1 μin	
			Deviation maximum	0.01 μm	0.5 μin	
			minimum	-0.01 μm	-0.3 μin	

Note) Accuracy is guaranteed under the 20°C temperature.

Certified by :

Measurement made by :

TOKYO SEIMITSU CO., LTD.

Metrology Company, Quality Assurance Division

4-2, Higashinakanuki-machi, Tsuchiura-city, Ibaraki, Japan

Tel: 81(Japan)-29-831-1234 Fax: 81(Japan)-29-831-8051

Přehled naměřených drsností u daných technologií

Typ dělení	Vzorek	Parametr	Drsnost [μm]		Průměrná drsnost [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
			I.	II.		
CO ₂ laser	1. vz.	Ra	5,939	7,173	6,556	0,873
		Rz	27,641	36,783	32,212	6,464
	12. vz.	Ra	5,968	3,448	4,708	1,782
		Rz	28,845	20,386	24,616	5,981
Fiber laser	1. vz.	Ra	3,374	2,155	2,765	0,862
		Rz	17,393	11,414	14,404	4,228
	12. vz.	Ra	2,199	2,057	2,128	0,100
		Rz	13,159	11,39	12,275	1,251
Plazma	1. vz.	Ra	7,836	-	-	-
		Rz	45,39	-	-	-
Kyslík	1. vz.	Ra	11,514	-	-	-
		Rz	77,879	-	-	-

Přehled naměřených mikrotvrdostí u daných technologií

Typ dělení	Vzdálenost [mm]	Tvrdost HV 0,2	Úhlopříčka d ₁ [mm]	Úhlopříčka d ₂ [mm]
CO ₂ laser	0,20	484	0,03	0,03
	0,40	307	0,03	0,04
	0,60	308	0,03	0,04
	0,80	299	0,04	0,04
	1,00	296	0,04	0,04
	1,20	295	0,04	0,04
	1,40	286	0,04	0,04
	1,60	287	0,04	0,04
	1,80	293	0,04	0,04
	2,00	297	0,03	0,04
	2,20	291	0,04	0,04
	2,40	287	0,04	0,04
	2,60	296	0,04	0,04
	2,80	295	0,04	0,04
3,00	297	0,04	0,04	
Fiber laser	0,20	530	0,03	0,03
	0,40	333	0,03	0,03
	0,60	313	0,03	0,03
	0,80	306	0,03	0,03
	1,00	297	0,04	0,03
	1,20	297	0,04	0,04
	1,40	295	0,04	0,04
	1,60	298	0,04	0,04
	1,80	296	0,03	0,04
	2,00	297	0,04	0,04
	2,20	299	0,04	0,04
	2,40	294	0,04	0,04
	2,60	299	0,03	0,04
	2,80	300	0,03	0,04
3,00	296	0,04	0,03	

Přehled naměřených mikrotvrdotí u daných technologií

Typ dělení	Vzdálenost [mm]	Tvrdotost HV 0,2	Úhlopříčka d ₁ [mm]	Úhlopříčka d ₂ [mm]
Plazma	0,20	311	0,04	0,03
	0,40	308	0,03	0,04
	0,60	302	0,04	0,03
	0,80	303	0,04	0,03
	1,00	240	0,04	0,04
	1,20	253	0,04	0,04
	1,40	269	0,04	0,04
	1,60	265	0,04	0,04
	1,80	266	0,04	0,04
	2,00	275	0,04	0,04
	2,20	270	0,04	0,04
	2,40	283	0,04	0,04
	2,60	290	0,04	0,04
	2,80	290	0,04	0,04
3,00	293	0,04	0,04	
Kyslík	0,20	299	0,03	0,04
	0,40	295	0,04	0,04
	0,60	266	0,04	0,04
	0,80	255	0,04	0,04
	1,00	252	0,04	0,04
	1,20	244	0,04	0,04
	1,40	226	0,04	0,04
	1,60	239	0,04	0,04
	1,80	259	0,04	0,04
	2,00	266	0,04	0,04
	2,20	270	0,04	0,04
	2,40	280	0,04	0,04
	2,60	286	0,04	0,04
	2,80	295	0,04	0,04
3,00	295	0,03	0,04	

Allgemeine Parameter		ST005M	ST010M	ST013M	ST015M	ST020M	ST025M	ST030M	ST035M	ST040M	ST045M	ST050M	ST060M	ST080M	ST100M	ST120M	ST127M	ST140M	ST150M	ST160M	ST180M	ST190M	ST200M
Tabellenname		DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-	DO-
Materialdicke		O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30	O2S0-30
Düse		0.5	1	1.3	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	8	10	12	12.7	14	15	16	18	19	20
Schneiden große Kontur		AAA10	AAA12	AAA12	AAA12	AAA12	AAA12	AAA12	AAA08	AAA08	AAA08	AAA08	AAA10	AAA10	AAA12	AAA12	AAA14	AAA14	AAA14	AAA14	AAA17	AAA20	AAA20
Konturbearbeitung		6)	6)	6)	6)	6)	6)	6)	6)	6)	6)	6)	6)	6)	6)	1)2)6)	1)2)6)	1)2)6)	1)2)6)	1)2)6)	1)2)	1)2)	1)2)
Lasierleistung		2000	2000	1100	1000	1000	1000	1000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Schnelgeschwindigkeit		9	9	7.2	6.4	5.5	4.7	4.3	3.9	3.7	3.3	3.15	2.8	2.15	1.8	1.5	1.3	1.1	1	0.9	0.75	0.7	0.65
Gasverbrauch pro Stunde		2.8	2.8	5.5	3.7	2.6	2.9	3.7	0.83	0.83	0.67	0.68	1	1.2	1.7	1.7	1.7	2	2	2	2.6	3.6	3.6
Gasverbrauch pro Meter		0.005	0.005	0.013	0.01	0.008	0.01	0.014	0.004	0.004	0.003	0.004	0.006	0.009	0.015	0.018	0.021	0.031	0.034	0.037	0.058	0.086	0.092
Schnittspalt		0.21	0.21	0.22	0.19	0.16	0.17	0.16	0.53	0.4	0.48	0.4	0.43	0.5	0.53	0.54	0.55	0.59	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Anfahren der Kontur		7.2	7.2	5.76	5.12	4.4	3.76	3.44	3.12	2.96	2.64	2.52	2.24	1	0.9	0.6	0.5	0.45	0.45	0.4	0.3	0.3	0.25
Schnelgeschwindigkeit		1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)
Konturbearbeitung		2000	2000	1300	1300	400	400	300	300	300	300	300	400	400	400	500	550	650	700	750	800	800	800
Lasierleistung		5.4	5.4	3.7	3	2	1	0.3	0.3	0.25	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.08
Schnelgeschwindigkeit		2.8	2.8	4.4	4.4	4.4	3.7	2.9	1.3	1.8	1.7	1.7	2.1	1.5	1.8	1.8	1.8	2.5	2.5	2.5	3.2	4.2	4
Gasverbrauch pro Stunde		0.009	0.009	0.02	0.025	0.025	0.031	0.049	0.074	0.1	0.11	0.14	0.34	0.26	0.31	0.31	0.31	0.42	0.42	0.42	0.54	0.71	0.84
Gasverbrauch pro Meter		0.21	0.2	0.21	0.18	0.16	0.14	0.14	0.33	0.2	0.35	0.33	0.33	0.35	0.39	0.4	0.45	0.65	0.7	0.65	0.5	0.45	0.38
Schnittspalt																							
Anfahren der Kontur		2.24	2.24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2
Schnelgeschwindigkeit		3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)
Konturbearbeitung		2000	2000	1300	1300	400	400	300	300	300	300	300	400	400	400	500	550	650	700	750	800	800	800
Lasierleistung		5.4	5.4	3.7	3	2	1	0.3	0.3	0.25	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.08
Schnelgeschwindigkeit		2.8	2.8	4.4	4.4	4.4	3.7	2.9	1.3	1.8	1.7	1.7	2.1	1.5	1.8	1.8	1.8	2.5	2.5	2.5	3.2	4.2	4
Gasverbrauch pro Stunde		0.009	0.009	0.02	0.025	0.025	0.031	0.049	0.074	0.1	0.11	0.14	0.34	0.26	0.31	0.31	0.31	0.42	0.42	0.42	0.54	0.71	0.84
Gasverbrauch pro Meter		0.21	0.2	0.21	0.18	0.16	0.14	0.14	0.33	0.2	0.35	0.33	0.33	0.35	0.39	0.4	0.45	0.65	0.7	0.65	0.5	0.45	0.38
Schnittspalt																							
Anfahren der Kontur		0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Schnelgeschwindigkeit		4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)	4)
Konturbearbeitung		1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5	5	5	5	5	5	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5	
Lasierleistung		0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1
Schnelgeschwindigkeit		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gasverbrauch pro Stunde		4.5	4.5	6.5	4	2.5	3	4	1.5	1.5	1.5	2	2.5	2.5	1.5	1.7	1.6	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5	
Gasverbrauch pro Meter		0	0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.07	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Schnittspalt		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Anfahren der Kontur		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Schnelgeschwindigkeit		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Konturbearbeitung		4.5	4.5	6.5	4	2.5	3	4	1.5	1.5	1.5	2	2.5	2.5	1.5	1.7	1.6	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5	
Lasierleistung		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Schnelgeschwindigkeit		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Gasverbrauch pro Stunde		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gasverbrauch pro Meter		5	4.5	5	5	5	3	2	3	3	3	3	3	3	1.5	1.7	1.6	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5	
Schnittspalt		0	0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.07	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Anfahren der Kontur		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Schnelgeschwindigkeit		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Konturbearbeitung		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Lasierleistung		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Schnelgeschwindigkeit		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Gasverbrauch pro Stunde		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Gasverbrauch pro Meter		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Schnittspalt		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Anfahren der Kontur		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Schnelgeschwindigkeit		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Konturbearbeitung		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Lasierleistung		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Schnelgeschwindigkeit		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Gasverbrauch pro Stunde		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Gasverbrauch pro Meter		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Schnittspalt		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25	4.5	4.75	5
Anfahren der Kontur		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.5	1.65	2.75	3	3.25			