



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POSOUZENÍ VLASTNOSTÍ REZNÉ HRANY OCELOVÉHO PLECHU PŘI TAVNÉM A OXIDAČNÍM REZÁNÍ PEVNOLÁTKOVÝM LASEREM

EVALUATION THE PROPERTIES OF THE CUTTING EDGE IN FUSION AND FLAME CUTTING BY
SOLID STATE LASERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MIROSLAV DOŠEKAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŠKA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Miroslav Došekal

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Posouzení vlastností řezné hrany ocelového plechu při tavném a oxidačním řezání pevnolátkovým laserem

v anglickém jazyce:

Evaluation the properties of the cutting edge in fusion and flame cutting by solid state lasers

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Odlíšné podmínky při tavném a oxidačním laserovém řezání mají vliv na výsledné vlastnosti řezné hrany plechu jako jsou tvrdost a drsnost, mikrostruktura. Tyto vlastnosti hrají důležitou roli při následných operacích jako je závitování nebo zalisování. Cílem práce je posouzení vlastností řezných hran a jejich vliv na popsání další technologie.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii řezání laserem. Navrhnout metodiku experimentu. Vyhodnotit drsnost a tvrdost řezné hrany v závislosti na procesních parametrech. Ověřit jejich vliv na následující technologie závitování a zalisování.

Seznam odborné literatury:

1. BENKO, B., FODEREK, P., KOSEK, M., BIELAK, R.: Laserové technologie, 1. vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.
2. TURÁK, M., Špeciálne metódy zvarovania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9.
3. KOLEKTIV AUTOR. Výroba a aplikované inžinierstvo ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Libor Mráz, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
editel ústavu

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

ABSTRAKT

DOČEKAL Miroslav: Posouzení vlastností řezné hrany ocelového plechu při tavném a oxidačním řezání pevnolátkovým laserem

Práce se zabývá porovnáním tavného a oxidačního způsobu laserového řezání při výrobě plošných součástí s názvem Trager konzoly. Porovnání probíhá vzhledem k dosažené kvalitě a vlastnostem řezných ploch u jednotlivých způsobů laserového řezání. Dále je posuzován vliv těchto vlastností na navazující technologické operace, kterými jsou zejména závitování a lisování matic do součástí. V rámci experimentální části diplomové práce proběhlo změření drsnosti řezných ploch a zařazení do třídy kvality řezu dle ČSN EN ISO 9013. Byly zhotoveny metalografické vzorky pro změření průběhu tvrdosti od řezné hrany směrem do materiálu. Metalografické vzorky také sloužily pro pořízení detailních snímků na mikroskopu a posouzení kvality zalisování matic. Poté byly změřeny řezné momenty působící na závitníky pro ověření dopadu vlastností řezných hran na závitování. Díky těmto měřením je poskytnuto dostatečné množství údajů pro porovnání vlivu vlastností řezných hran u jednotlivých způsobů laserového řezání na navazující operace. Nakonec je provedeno srovnání jednotlivých způsobů z hlediska nákladů na výrobu. Podle všech údajů a dosažených závěrů byl určen jako nejvhodnější tavný způsob laserového řezání pro výrobu součástí.

Klíčová slova: laserové řezání, lisování matic, oxidační laserové řezání, řezná plocha, řezná hrana, tavné laserové řezání, vláknový laser, závitování

ABSTRACT

DOČEKAL Miroslav: Evaluation the properties of the cutting edge in fusion and flame cutting by solid state lasers

The thesis compares oxidation and fusion laser cutting methods in the production of sheet components called Trager consoles. Individual methods of laser cutting are compared in terms of achieved quality and properties of cutting areas. Consequently, the effect of these properties on consecutive technological operations, which are mainly threading and pressing the nuts into components, are evaluated. In the experimental part of the thesis the roughness of cut surfaces was measured and the cuts were classified into quality classes according to the ČSN EN ISO 9013 standard. Metallographic samples were taken in order to measure hardness and determine its course in the direction from the cutting edge into the material. The metallographic samples were further used for capturing detailed images on the microscope and assessing the quality of nuts pressing. Afterwards, the cut moments affecting taps were measured in order to verify the impact of cutting edge properties on threading. These measurements provided sufficient data for comparing the influence of cutting edge properties in individual methods of laser cutting on consecutive operations. Finally, individual methods were compared in terms of production costs. According to all the data and the conclusions reached, fusion method was identified as the most suitable method of laser cutting for components manufacturing.

Keywords: laser cutting, nuts pressing, oxidation laser cutting, cutting area, cutting edge, fusion laser cutting, fiber laser, threading

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOČEKAL, Miroslav. *Posouzení vlastností řezné hrany ocelového plechu při tavném a oxidačním řezání pevnolátkovým laserem*. Brno, 2015. 60s, 3 výkresy, 31 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 27. 5. 2015

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Vojtěchu Řiháčkovi za pomoc při měření tvrdosti. Taktéž děkuji Jiřímu Čechovi za pomoc při měření řezných momentů.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Laserové řezání a alternativní technologie	11
1.1.1 Řezání kyslíkem	11
1.1.2 Řezání plazmou	12
1.1.3 Řezání vodním paprskem	13
1.1.4 Vysekávání	15
1.1.5 Řezání laserem.....	16
2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE A DĚLENÍ MATERIÁLU	18
2.1 Vlastnosti laserového záření	18
2.2 CO ₂ lasery	21
2.3 Vláknové lasery	22
2.4 Diskové lasery.....	23
2.5 Porovnání CO ₂ a vláknového laseru	23
2.6 Oxidační řezání	25
2.7 Tavné laserové řezání	29
2.8 Řezné parametry a kvalita řezu.....	31
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	38
3.1 Měření drsnosti	39
3.2 Měření tvrdosti.....	44
3.3 Měření řezných momentů	50
4 TECHNICKO - EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	54
5 ZÁVĚR.....	60

Seznam použitých zdrojů

Seznam symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

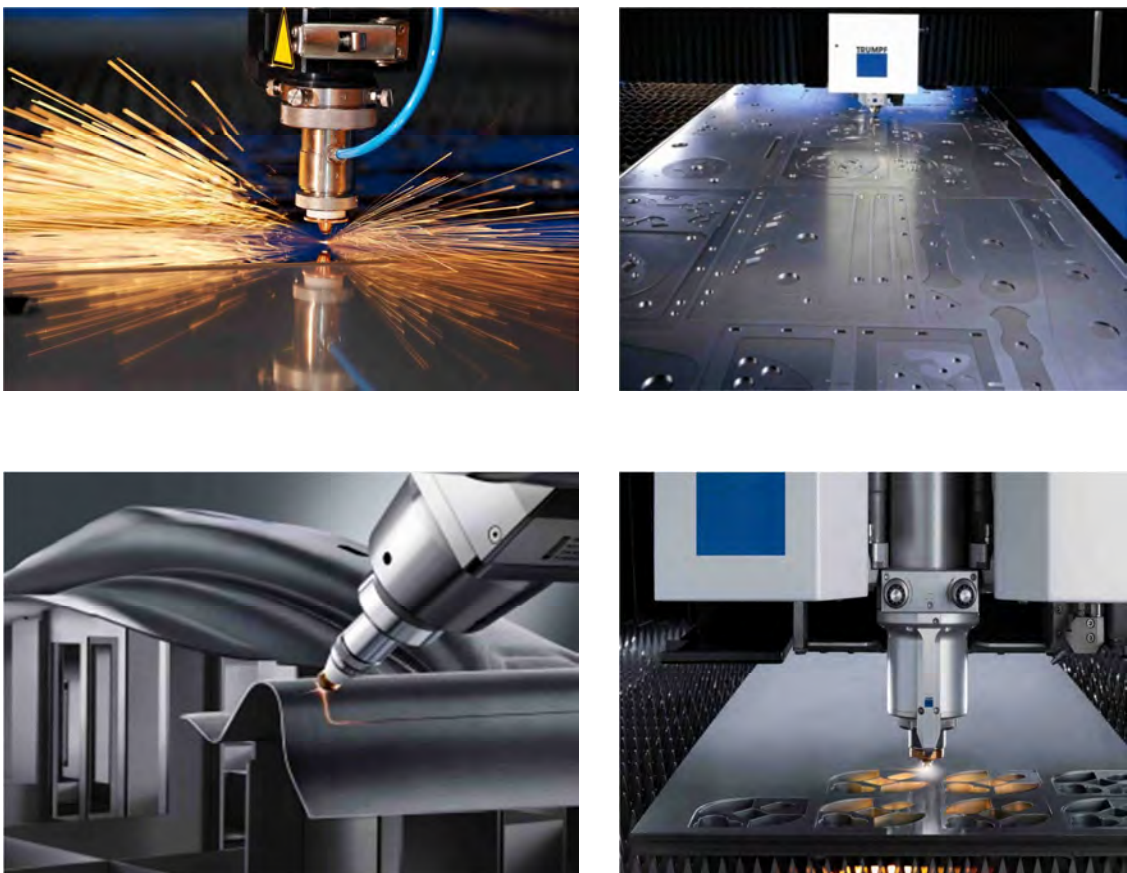
Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD [13], [14], [45], [51], [52], [57]

V dnešní době existuje široká škála technologií dělení materiálů, které lze použít pro výrobu plošných součástí. U velkosériové výroby převládá stříhání. U malosériové výroby nebo u výroby rozměrných plošných součástí převládají progresivní technologie výroby v kombinaci s CNC řízením. Mezi nimi má dnes už pevné místo i laserové řezání. Díky dynamičnosti děje, vysoké přesnosti a nízkým provozním nákladům patří mezi čím dál častěji používanou technologii, zvláště při výrobě složitých plošných součástí. Pro laserové řezání materiálu se nejvíce používají CO₂ lasery, diskové a vláknové lasery. CO₂ laser je konstrukčně starší a složitější než diskové a vláknové lasery. Prozatím má své nezastupitelné místo při dělení tlustších materiálů. Největší rozvoj prodělává nová generace vláknových laserů v oblasti zpracovávání tenkých plechů. Řezání vláknovým laserem poskytuje nárůst řezné rychlosti a malé nároky na údržbu. Díky těmto vlastnostem je snaha stále rozvíjet a vylepšovat vláknové lasery.

Při výrobě plošných součástí jsou nejprve z výchozího polotovaru v podobě tabule plechu laserovým řezáním vyřezány otvory různých tvarů a obrys součástí. Poté může následovat mnoho dalších technologických operací. Může se jednat o ohýbání, ohraňování, řezání závitů, lisování matic a integrace dalších prvků, například přivařování svorníků. U laserového řezání, jako u všech primárních operací je velmi důležité dbát na kvalitu vytvořených ploch a na jejich vlastnosti. Výsledné vlastnosti vytvořených ploch ovlivňují přesnost, proveditelnost navazujících operací, a tak i jejich výrobní náklady a časy. Příklady laserového řezání jsou zobrazeny na obr. č. 1.



Obr. č. 1 Laserové řezání [45], [51], [52], [57]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [3], [8], [39], [54]

Plošná součást s názvem Trager konzola je vyráběna ve firmě AQUA dem s. r. o. Jedná se o menší firmu zabývající se CNC zpracováním plošného materiálu, pomocí vláknového laseru a vodního paprsku. Zabývá se také 3D měřením, CNC ohýbáním plechů a souvisejícími strojními operacemi.

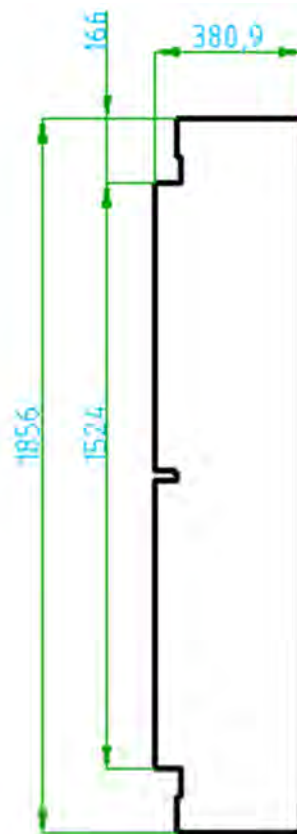
Trager konzola je součást dveřního mechanismu osobního kolejového vozidla. Slouží jako platforma tohoto mechanismu. Výroba součásti je v první fázi realizovaná laserovým řezáním. Vyrábí se ve více variantách v počtu cca 800 kusů za měsíc. Materiál součásti je S355J2C+N. Výchozí polotovár je plech o rozměrech 2,5 x 1250 x 2520 mm. Nákras rozvinutého tvaru jedné z varianty Trager konzoly s hlavními rozměry je na obr. č. 2. Její výkresová dokumentace je uvedena v příloze na výkresu č. 1 a 2.

Při výrobě jsou nejdříve vyříznuty všechny otvory a rozvinutý tvar. Součást obsahuje desítky otvorů různých tvarů a velikostí od desítek po jednotky milimetrů v závislosti na typu Trager konzoly. Mezi nejmenší patří výchozí otvory $\phi 2,5$, $\phi 3,3$, $\phi 4,2$ mm pro řezání závitů M3, M4, M5 a výchozí otvory $\phi 4,25$ mm pro lisování lisovacích matic M3.

Následují další technologické operace, ohýbání na ohraňovacím lise, zalisování matic do vyříznutých otvorů nebo řezání závitů. Příklad Trager konzoly po ohýbání na ohraňovacím lise je vyfocen na obr. č. 3.

Výsledné vlastnosti řezných hran otvorů, mezi které patří především drsnost, tvrdost a mikrostruktura, mají významný vliv na kvalitu závitů, opotřebení závitníků při závitování a také na kvalitu lisovaného spoje součásti a matice.

Tavné a oxidační laserové řezání se navzájem liší výslednou kvalitou a vlastnostmi řezné hrany. Rozdíly způsobují odlišné mechanismy formování řezné spáry, řezné parametry a podmínky při řezání. Pro výběr vhodného způsobu laserového řezání je nutné experimentálně ověřit drsnost a tvrdost řezných hran v závislosti na řezných parametrech. Experimentálně zjištěná drsnost řezných hran bude posuzována dle normy ČSN EN ISO 9013. Pro určení vlivu jednotlivých způsobů laserového řezání na závitování a lisování matic je nutné změřit řezné momenty při závitování a ověřit kvalitu zalisování lisovacích matic. Jednotlivé způsoby laserového řezání budou posouzeny také z ekonomického hlediska.



Obr. č. 2 Nákras Trager konzoly [39]



Obr. č. 3 Příklad Trager konzoly

1.1 Laserové řezání a alternativní technologie [1], [5], [7], [13], [14], [20], [25], [26], [36], [37], [47], [62]

Obdobné plošné součásti je možné vyrobit i jinými technologiemi než laserovým řezáním. Nabízí se celá řada technologií výroby rozvinutého tvaru součásti. Společný znak těchto technologií je především v CNC řízení. Lze vyřezávat jednoduché, tak i velmi tvarově složité součásti bez nutnosti vytvářet v pomocných pracovních procesech drahé a jednorúčelové nástroje, jako je tomu například u postupových stříhadel. Při stříhání navíc dochází k postupnému otupování těchto drahých nástrojů. Kromě laserového řezání lze vyřezávat plošné součásti i mnoha jinými způsoby. Je možné zvažovat technologie zpracování plechů, které mají v některých ohledech podobné výrobní možnosti při zpracování plátů plechů, jako laserové řezání. Mezi alternativní technologie výroby rozvinutého tvaru plošných součástí patří:

- řezání kyslíkem,
- řezání plazmou,
- řezání vodním paprskem,
- vysekávání,
- řezání laserem.

1.1.1 Řezání kyslíkem [5], [6], [19], [26], [27], [37], [49]

Řezání kyslíkem patří mezi metody tepelného dělení materiálu. Řezaný materiál je spalován v proudu přiváděného kyslíku. Používá se pro dělení nízkouhlíkových ocelí a nízkolegovaných ocelí. Ostatní materiály nejsou touto metodou dělitelné. Rozsah řezaných tlouštěk je od 0,5 mm do 300 mm pro kvalitní řez. Za optimálních podmínek lze řezat rychlostí až 800 mm/min. Na obr. č. 4 je zobrazen hořák pro strojní řezání, který je upevněn na CNC polohovacím zařízení.



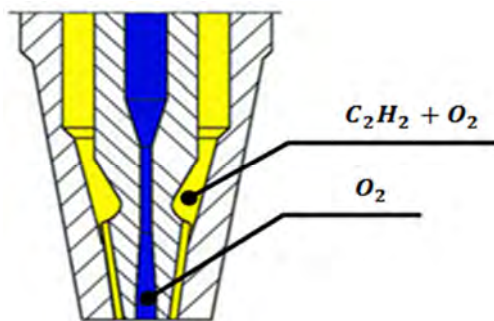
Obr. č. 4 Hořák pro strojní řezání [5]

Kovový materiál lze řezat kyslíkem, pokud splňuje následující podmínky:

- Kov ohřátý na zápalnou teplotu se musí v proudu kyslíku spalovat.
- Při procesu spalování kovů se musí uvolňovat dostatečné množství tepla, které udrží v chodu exotermickou reakci kovu a kyslíku. Vzniklé teplo musí zajistit přehřev materiálu pro jeho další spalování a zároveň pokrýt tepelné ztráty.
- Zápalná teplota kovu musí být nižší než teplota tavení nebo rovna této teplotě.
- Teplota tavení oxidů musí být nižší nebo rovna teplotě tavení řezaného materiálu.
- Produkty oxidace (oxidy a zplodiny hoření) musí být tekuté natolik, aby je bylo možné vyfukovat z místa řezu proudem přiváděného kyslíku.

Řezaný materiál je nutné nejprve v místě řezu přehřát na zápalnou teplotu. Přehřátí materiálu provádíme většinou kyslíko-acetylenovým plamenem, kterým lze vyvinout teplotu 3150°C. Zápalná teplota materiálu se pohybuje v závislosti na jeho druhu od 1050°C do 1350°C. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku se zvyšuje zápalná teplota. V další fázi začne materiál v místě přehřátí oxidovat. Vlivem oxidace materiálu, tedy exotermické reakce, se začne zvyšovat teplota v místě řezu. Po přehřátí je do místa řezu přiveden proud stlačeného kyslíku, který nastartuje ještě intenzivnější oxidaci.

Čistota kyslíku musí být minimálně 99,3 %. Po přivedení kyslíku do předehřáté oblasti se zvyšuje teplota a celý proces se urychluje. Při spalování řezaného materiálu vznikají oxidy železa: FeO (oxid železnatý), Fe_2O_3 a Fe_3O_4 (oxid železitý a železno-železitý). Na obr. č. 5 je zobrazen průchod plynu hořákem během řezání. V poslední fázi řezání dochází k vyfukování oxidů a nespáleného železa z řezné spáry.



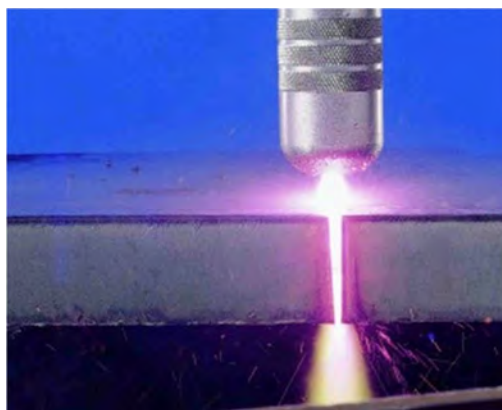
Obr. č. 5 Průchod plynu hořákem [19]

Při řezání kyslíkem vzniká tepelně ovlivněná oblast materiálu. Vytváří se zde vnitřní pnutí a následná deformace. Velikost deformace je závislá na množství vneseného tepla, na chemickém složení materiálu a na jeho předchozím zpracování (válcování, tváření...). U některých materiálů mohou vznikat na řezné ploše prasklinky, které se mohou dále šířit do materiálu. Tento jev lze odstranit, pokud bude řezaný materiál před samotným řezáním žhán na odstranění vnitřního pnutí.

Řezání kyslíkem je produktivní metoda dělení materiálu s nízkými pořizovacími náklady. Nejvýhodnější a nejproduktivnější je použití této technologie při dělení nelegovaných a nízkolegovaných ocelí v rozsahu tlouštěk od 10 do 100 mm. Používají se zařízení pro ruční i pro strojní dělení. Strojní zařízení je vzhledem k nižší ceně často osazováno více hořáky, což zvyšuje produktivitu řezání. Nevýhoda je v omezeném sortimentu materiálu, který lze touto metodou dělit. Využívá se hlavně tam, kde je potřebný široký rozsah tlouštěk řezaného materiálu.

1.1.2 Řezání plazmou [20], [37], [38], [55]

Plazmou lze řezat všechny elektricky vodivé materiály. Většinou se používá pro dělení uhlíkových a korozivzdorných ocelových plechů od 6 mm do 250 mm. Často se plazmou reže bronz, hliník, hořčík, litina, měď, mosaz, molybden, nikl, titan, wolfram. Princip metody je založen na tepelných a dynamických účincích plazmatu. Plazmový paprsek při řezném procesu prochází skrze celou tloušťku materiálu. Vlivem vysoké teploty plazmy a intenzity přenosu tepla mezi plazmovým paprskem a materiálem dochází k tavení a sublimaci materiálu. Tavenina je odstraněna z řezné spáry ve formě jemně rozprášené tekutiny. Intenzita přenosu tepla do materiálu činí přibližně $24,1 - 68,7 \text{ MW/m}^2$. Na obr. č. 6 je zobrazen plazmový hořák při řezání materiálů.



Obr. č. 6 Řezání plazmou [55]

Plazma je plyn, jenž obsahuje volné nosiče náboje, kterými jsou elektrony a ionty. Na rozdíl od plynu je elektricky vodivá a silně reaguje na elektrické a magnetické pole. Jako celek je elektricky neutrální, v makroskopických objemech je vždy stejné množství elektronů a iontů. Při zapalování plazmového hořáku hoří elektrický oblouk mezi jeho hubicí a netavící se elektrodou. Kolem elektrody je přiváděn plazmový plyn, nejčastěji se jedná o argon. Může se jednat i o další plyny jako je směs argonu a vodíku, hélium, dusík, kyslík, oxid uhličitý, vzduch. Pomocí energie elektrického oblouku je plazmový plyn přeměňován na plazmu. Prvotní elektrický oblouk má svůj zdroj a slouží pouze pro zapálení hořáku. Poté je zapalovací oblouk přerušen a je zapálen oblouk mezi řezaným materiálem a elektrodou.

Vzniklá plazma je zaostřována do úzkého svazku fokusačním plynem nebo proudem vody. Fokusační plyny jsou argon, směs argonu a vodíku nebo směs argonu a dusíku. Do místa řezu může být přiváděn i ochranný plyn, který tvoří ochranou atmosféru. Zde se jedná čistě o inertní plyny, hlavně argon. Teplota plazmy závisí na druhu použitého plazmového plynu. V tabulce č. 1 je uveden druh plazmového plynu a jemu odpovídající dosahovaná teplota plazmy.

Tab. č. 1 Teploty plazmy [38]

Plazmový plyn	hélium	argon	vodík	dusík
Teplota plazmy [°C]	20000	15000	8000	7000

Na kvalitu řezu mají vliv následující parametry, které musí být vhodně voleny s ohledem na, řezaný materiál:

- průměr trysky,
- výkon zdroje pro elektrický oblouk,
- druh plazmového plynu,
- vzdálenost mezi hořákem a materiálem,
- rychlost posuvu plazmového hořáku,
- úhel naklonění plazmového hořáku.

Jedná se o produktivní a univerzální způsob dělení materiálu, který v současnosti v široké míře nahrazuje řezání kyslíkem. Plazmové řezání je produktivnější ve středních řezaných tloušťkách, uvádí se do 160 mm, je však dražší. Pro silnější tloušťky je výhodnější řezání kyslíkem, přitom je ale nutné brát v úvahu typ materiálu a konkrétní aplikaci. Plazmové řezání je poměrně hlučný proces, hluk lze omezit při řezání pod vodou. Při řezání dochází k velkému vývinu zdraví škodlivých plynů a dýmů, proto je nutné zajistit odsávání. Výhoda této technologie je menší tepelné ovlivnění materiálu.

Ve srovnání s laserovým řezáním je však u plazmového řezání větší teplotní ovlivnění materiálu. Tepelně ovlivněná zóna při řezání plazmou je v rozsahu od 4 mm do 10 mm. I když řezání vykazuje dobrou kvalitou dělených ploch, oproti laserovému řezání je kolmost řezu mnohem horší, vzniká větší zaoblení vrchní řezné hrany. Dosahovaná přesnost je 0,01 mm.

1.1.3 Řezání vodním paprskem [13], [14], [22], [36], [47], [48], [65]

Dělení materiálů probíhá pomocí tenkého paprsku vody o vysokém tlaku a rychlosti. Vodní paprsek dosahuje vysoké hustoty kinetické energie na jednotku plochy, vniká do materiálu, vytváří řeznou spáru a prostupuje skrze celou tloušťku materiálu. Na obr. č. 7 je zobrazeno řezání vodním paprskem. Rozlišujeme dva hlavní způsoby řezání vodním paprskem.

První způsob je označován WJM (Water Jet Machining), jedná se o paprsek složený pouze z vody. Je vhodný pro dělení nekovových materiálů nebo tenkých měkkých a málo houževnatých kovových materiálů. Materiál je řezán pouze hydrodynamickými účinky paprsku vody. U tohoto způsobu jsou používány větší tlaky vodního paprsku až 690 MPa.



Obr. č. 7 Řezání vodním paprskem [22]

Druhý způsob je označován AWJ (Abrasive Water Jet Machine). V tomto případě je vodní paprsek složen z vody a z přidaného abraziva. Používané abrazivo je umělý granát, olivín, umělý korund nebo křemenný písek. AWJ je v praxi více používán, působí na dělený materiál hydroabrazivním účinkem. Používají se nižší tlaky, kolem 400 MPa. AWJ paprskem lze dělit téměř všechny druhy technických materiálů, kovové i nekovové. Rozsah řezaných tloušťek materiálů se pohybuje od 0,05 do 300 mm. Často je využíván pro dělení legovaných a nelegovaných ocelí, korozivzdorných ocelí, litin, hliníku, kobaltu, mědi, niklu, titanu a jejich slitin. Mezi nekovové materiály dělené vodním AWJ paprskem patří: beton, kámen, keramika, sklo, guma, plasty, různé heterogenní materiály nebo materiály poskládané ve vrstvách nad sebou, například guma a kov. Mezi hlavní výhody řezání vodním paprskem patří:

- Vysoká rychlost řezání.
- Vysoká přesnost řezání – standardně dosahovaná přesnost je $\pm 0,1$ mm, lze dosáhnout i přesnosti $\pm 0,025$ mm.
- Vysoká účinnost procesu až 80%.
- Tenká řezná spára (pro tenké materiály činí 0,3 mm).
- Dobrá kvalita řezu.
- Není nutné předvrtávat startovací otvory.
- Nevzniká tepelné ovlivnění materiálu, ořepky na řezné hraně, prach ani kouřové zplodiny.
- Je to velmi všestranný technologický proces – možnost dělení skoro všech technických materiálů.
- Tloušťka děleného materiálu může dosahovat až 300 mm.

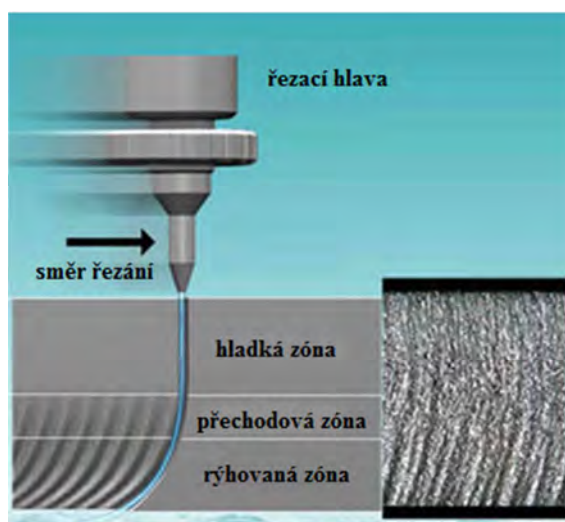
Mezi hlavní nevýhody patří:

- Nízká životnost některých součástí – s tím spojené vyšší provozní náklady.
- Hlučnost řezného procesu, tlumení zbytkové energie v lapači vody dosahuje až 105 dB.
- Kontakt součásti s vodou - delší doba sušení.

Řezná hrana má dobrou kvalitu bez výskytu ořepů na spodním okraji a není tepelně ovlivněná. Kvalita řezu závisí na mechanických vlastnostech děleného materiálu a na řezných parametrech. Mezi hlavní řezné parametry patří:

- tlak vody,
- rychlost proudění,
- rozměr otvoru dýzy,
- vzdálenost mezi dýzou a obrobkem,
- úhel sklonu paprsku,
- druh a velikost brusiva.

Řezné parametry ovlivňují kvalitu řezné plochy a velikost úběru materiálu. Kvalita řezné plochy je ve velké míře ovlivněna abrazivním mechanismem úběru materiálu.



Obr. č. 8 Řezný proces AWJ [65]

Mechanismus úběru materiálu se mění s přibývajícím hloubkou v materiálu, protože paprsek ztrácí kinetickou energii. Podle převládajícího mechanismu úběru lze rozdělit řeznou hranu na tři zóny, viz obr. č. 8:

- oblast řezného opotřebení - hladká zóna bez rýhování, nachází se v horní části řezné spáry,
- přechodová zóna,
- oblast deformačního opotřebení - zóna drsného rýhování. V této zóně jsou viditelné rýhy a stoupá drsnost povrchu oproti hladké zóně.

1.1.4 Vysekávání [16], [59], [62]

Vysekávání patří mezi tvářecí technologie, provádí se na CNC vysekávacích lisech. Tato technologie je v širokém rozsahu používána pro zpracování tabulového materiálu, hlavně pro niblování, děrování, prorážení různých děr a tvarů. Princip dělení materiálu je založen na působení střížným smykovým napětím na materiál, stejně jak je tomu u stříhání. Při interakci nástroje a materiálu dochází k oddělování materiálu mezi protilehlými břity. Materiál je oddělen po překročení smykového napětí ve stříhu.



Obr. č. 9 Děrovací kombinovaný lis [16]

Střížný nástroj je složen z razníku a matrice, které mají příslušné vůle potřebné pro střížný proces. Na obr. č. 9 je zobrazen příklad děrovacího kombinovaného lisu s C rámem, na obr. č. 10 je příklad razníku s matricí.

Vysekávání je určeno spíše pro tenčí plechy od 0,3 mm do maximální tloušťky zpracovávaného plechu 8 mm. Pro nerezové plechy se maximální tloušťka pohybuje do 4 mm. Dosahovaná přesnost je $\pm 0,1$ mm. Jedná se o velmi produktivní způsob výroby tvarových součástí z plechů. Při velkých sériích vyráběných kusů je vysekávání efektivnější, než řezání laserem. Často se tato technologie kombinuje s laserovým řezáním, kdy CNC stroj obsahuje jednu vysekávací hlavu a jednu řeznou laserovou hlavu. Vysekáváním se zhotovují otvory a laserem se vyřezávají složité rozměrné tvary a vnější kontury součástí. Vysekávací stroje mohou provádět různé drobné tvářecí operace, jako je například řezání závitů nebo vytváření prolisů.

Nejčastěji zpracovávané materiály jsou hlavně nízkolegované konstrukční oceli a nerezové oceli. Velmi často jsou také zpracovány pozinkované ocelové plechy, protože při vysekávání nedochází ke spalování zinku. Dále lze zpracovávat hliník, měď a jejich slitiny. Mezi nekovové materiály patří především plasty, pryže, teflon, polyuretany, molitan, korek, kůže, textil a papír.

Součást může být vysekána na jeden zdvih tvarovým nástrojem v případě menších součástí nebo otvorů nebo je vytvořena niblováním. Niblování je způsob výroby větších tvarů, kdy je hotový tvar vytvořen postupným úběrem menšího nástroje, jehož dráha se překrývá.



Obr. č. 10 Razník a matrice [16]

Mezi hlavní výhody vysekávání patří vysoká produktivita a přesnost. Nevzniká tepelné ovlivnění materiálů a následná deformace. Mezi nevýhody patří možný vznik otlaků na horní straně materiálů a zaoblení hrany, vznik otřepů na spodní straně střížné plochy, opotřebení nástroje. U niblování může vznikat horší kvalita povrchu a nerovnosti vlivem překrývání stopy nástroje. Na kvalitu a přesnost výroby má také vliv druh materiálu, jeho mechanické vlastnosti a parametry procesu vysekávání. Mezi hlavní parametry patří:

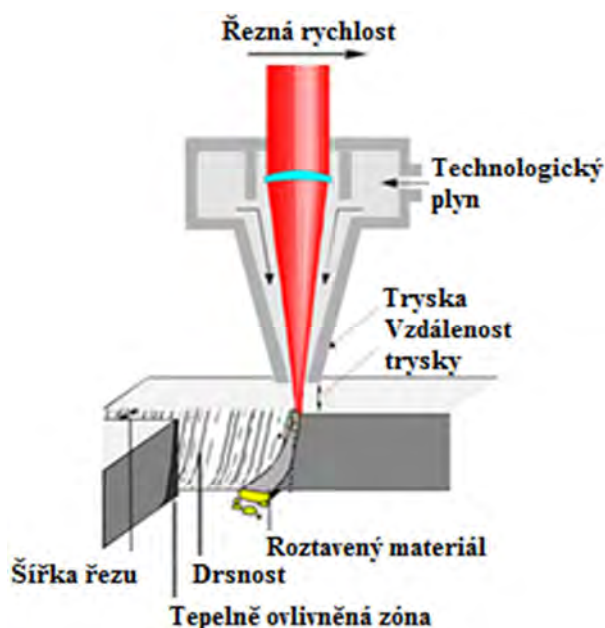
- vysekávací síla,
- střížná vůle,
- přesnost polohování a vedení nástroje,
- druh a provedení nástroje,
- frekvence úderů nástroje.

Vysekávání je vysoce produktivní technologie, produktivitou výroby se dá srovnávat s laserovým řezáním. Dosahovaná přesnost a kruhovitost vyráběných otvorů je vyšší než u laserového řezání. Otvor je vytvořen na jeden zdvih nástroje. Hrana otvoru součásti je velmi hladká, má malou drsnost a je bez tepelného ovlivnění. U vysekávání je potřeba pro výrobu složité součásti velký počet speciálních nástrojů, které jsou velmi drahé a postupem času dochází k jejich otupování. Proto se vysekávání vyplatí jen pro výrobu velkých sérií. Dobrá varianta je v podobě kombinovaného vysekávacího stroje s laserovým řezáním.

1.1.5 Řezání laserem [1], [6], [29], [31], [37], [38], [40], [41], [61]

Řezání laserem je metoda tepelného dělení materiálů. Laserem lze dělit téměř všechny druhy materiálů. Je možné řezat uhlíkovou ocel, vysokolegovanou ocel, litinu, barevné kovy a různé kovové slitiny. Dále lze dělit plasty, dřevo, lepenku a mnoho dalších nekovových materiálů. U kovových materiálů se řezaná tloušťka pohybuje do 30 mm v závislosti na výkonu laseru. Na obr. č. 11 je zobrazen princip řezání laserem.

Energii potřebnou pro řezání materiálu získáváme ze zaostřeného laserového paprsku, který dopadá na povrch materiálu. Jedná se o elektromagnetické záření s vysokou hustotou výkonu na jednotku dopadové plochy. U řezání materiálu se hustota výkonu pohybuje kolem 10^8 Wcm^{-2} . Při interakci materiálu a paprsku se část paprsku odrazí od povrchu materiálu, část se absorbuje do materiálu a zbytek projde skrz něj. Vlivem absorpce materiálu se mění laserové záření na tepelnou energii. Rychlost ohřevu se pohybuje v řádech 10^6 K/s . Materiál se velmi intenzivně ohřívá, taví a sublimuje. Po natavení je tavenina vyfukována dolů pracovním plynem, tak vzniká řezná spára. Podle druhu použitého pracovního plynu lze laserové řezání rozdělit na tavné, oxidační a sublimační řezání.



Obr. č. 11 Řezání laserem [29]

U sublimačního řezání je hustota energie laserového paprsku nejvyšší. Řezaný materiál se z místa řezu odpařuje, okraje řezné spáry se taví. Vzniklé páry tvoří v řezné spáře vysoký tlak, derou se ven, a tak vypuzují taveninu. Pro lepší odvod par a taveniny je do místa řezu přiváděn inertní plyn, který slouží i jako ochranná atmosféra. Laser pracuje v pulsním režimu, v intervalech mezi pulzy je umožněn lepší odvod par a taveniny z řezné spáry. Asistenční plyny používané pro sublimační řezání jsou argon, dusík, hélium. Použití řezného plynu má i své negativum, neboť ochlazuje materiál a místo řezu. Pro sublimaci materiálu je tak potřeba větší vnášený výkon.

Sublimační řezání se hlavně používá pro materiály, které netvoří taveninu nebo pro nízko tavitelné materiály, například dřevo, dřevotřísku, lepenku, různé fólie z plastických hmot, pěny a textilie. Tento způsob je vhodný i pro výrobu drobných složitých kovových součástí.

Oxidační a tavné laserové řezání jsou nejvíce používané způsoby laserového řezání v průmyslové praxi pro dělení kovových materiálů. Oba tyto způsoby budou podrobněji popsány níže.

Řezání laserem je velmi produktivní a přesná technologie, vyznačující se minimálním tepelným ovlivněním materiálu. Přesnost řezání se pohybuje $\pm 0,05$ mm v závislosti na materiálu a jeho tloušťce. Tepelné ovlivnění je mnohem menší než u řezání plazmou a kyslíkem. Tepelně ovlivněná zóna je cca od 0,5 mm do 3 mm. Množství vnesené energie jde velmi přesně řídit. Řez laserem vykazuje výbornou kolmost a přesnost. Paprsek není ovlivňován elektrickým ani magnetickým polem. Vhodnost materiálu pro laserové řezání určují termofyzikální vlastnosti a schopnost absorpce.

2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE A DĚLENÍ MATERIÁLU [1], [21], [30], [35], [38], [40], [41], [63]

Laser je kvantový zesilovač světla, který pracuje na základě stimulované emise záření. Název laser je zkratka odvozená z anglického popisu děje: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesílení světla stimulovanou emisí záření).

Laserový paprsek je elektromagnetické záření, které lze zaostřit do miniaturní plošky, a dosáhnout tak vysoké hustoty energie připadající na jednotku plochy. Vzniká v rezonátoru laseru pomocí stimulované emise záření. Rezonátor je tvořen aktivním prostředím, které je vloženo mezi dvě zrcadla vzdálená o násobek vlnové délky generovaného záření. Aktivní prostředí je vhodná látka umožňující kvantové přechody elektronů na vyšší energetické hladiny a zpět. Aktivní prostředí může být tvořeno směsí plynů, pevnou látkou, kapalinou nebo krystalem polovodičového prvku. Pro přechod na vyšší energetické hladiny musí být do aktivního prostředí dodáváno potřebné množství energie. Čerpání energie může být různé, většinou je realizováno optickou cestou nebo elektrickým výbojem. Jedno zrcadlo rezonátoru je plně odrazivé a druhé polopropustné. Po dostatečném zesílení laserových paprsků, které kmitají mezi zrcadly, vychází laserové záření již s požadovanými vlastnostmi ven z rezonátoru. Na výstupu je podle potřeby upraveno optickou soustavou.

Teoretické podklady pro sestavení laserů dal už v roce 1917 Albert Einstein, který jako první objevil a popsal podstatu stimulované emise záření a podstatu laseru. Vycházel ze základů kvantové elektrotechniky, které pět let před ním zformulovali M. Planck a N. Bohr. Myšlenky na sestavení laseru jako kvantového generátoru započaly v roce 1954. První laser byl sestaven roku 1960 a měl aktivní prostředí ze syntetického rubínu.

Postupem času bylo vyvinuto mnoho typů laserů s odlišným druhem a tvarem aktivního prostředí, různou generovanou vlnovou délkou laserového záření, způsobem čerpání energie do aktivního prostředí, typu kvantových přechodů a časového režimu provozu laseru. Mnoho z nich jsou široce využívány v průmyslu k různorodým aplikacím.

Nejvíce využívané ve strojírenské praxi je hlavně řezání materiálu, svařování, povrchové kalení, navařování prášků, vrtání, laserové popisování, nově je zkoumána možnost odstranění vnitřního pnutí v materiálu velmi silnými, ultrakrátkými laserovými pulzy.

2.1 Vlastnosti laserového záření [1], [7], [17], [18], [25], [31], [39], [40], [41], [63]

Laserové záření je možné použít v technické praxi jako zdroj energie díky jeho specifickým vlastnostem, mezi které patří:

- monochromaticnost,
- koherence,
- divergence,
- módová struktura.

Díky těmto specifickým vlastnostem je možné zaostřit laserový paprsek na minimální plošku materiálu. Proto lze dosáhnout velmi vysoké hustoty dodávaného výkonu připadající na jednotku plochy, běžně se pohybuje v rozsahu 10^4 až 10^8 Wmm⁻².

Na kvalitu jmenovaných vlastností laserového paprsku má určující vliv rezonátor. Záření vystupující z rezonátoru je monochromatické, je-li složeno pouze z jedné vlnové délky elektromagnetického vlnění. Vystupující záření je koherentní, mají-li jednotlivé elektromagnetické vlny stejnou fázi nebo jsou fáze od sebe posunuty o stejnou hodnotu v prostoru a čase.

Koherence má vliv na divergenci laserového paprsku. Divergence udává úhlovou rozbíhavost paprsku a ovlivňuje velikost jeho stopy, a tak i hustotu výkonu připadající na jednotku plochy. Divergence vyjádřena úhlem, se nachází na obr. č. 12. Úhel divergence se určí ze vztahu:

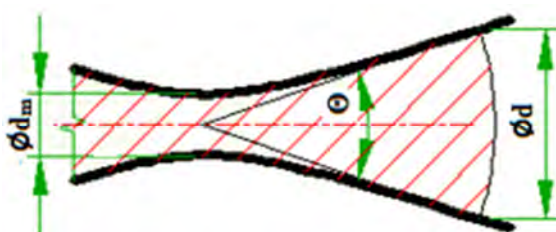
$$\Theta = \frac{4\lambda}{\pi d_m} \text{ [rad]} \quad (1.1)$$

Kde: Θ - rozbíhavost paprsku (divergence) [rad]

λ - vlnová délka záření [mm]

π - Ludolfovo číslo rovno přibližně hodnotě 3,1415

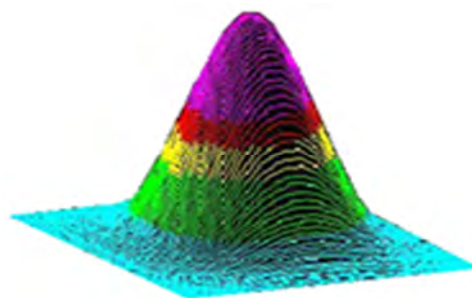
d_m - průměr laserového paprsku měřený v místě, kde intenzita je $\left(\frac{1}{e^2}\right)$ násobkem intenzity na jeho ose [mm]



ϕd - je průměr nezaostřeného paprsku,
 ϕd_m - je průměr stopy paprsku v ohniskové vzdálenosti čočky,
 Θ - je divergence laserového paprsku.

Obr. č. 12 Divergence laserového paprsku [63]

Energie v laserovém paprsku není rozložena rovnoměrně. V příčném řezu paprsku se v různých bodech liší rozložení intenzity energie, kterou vyjadřuje módová struktura označovaná zkratkou TEM mn (Transversal Electromagnetic Mode of order mn). Písmena 'm' a 'n' označují počet minim na průřezu paprsku v jednotlivých souřadnicích kartézského nebo cylindrického systému. Při použití kartézského souřadného systému se jedná o souřadnice 'x' a 'y', u cylindrického systému je to poloměr a úhel.



Obr. č. 13 TEM 00 [31]

Hlavní vliv na módovou strukturu má konstrukce rezonátoru. Ideální je Gaussovo rozložení, označeno jako TEM 00, viz obr. č. 13. Jedná se o rotačně symetrické rozložení intenzity energie, kde největší intenzita je uprostřed na ose z. Čím více se blížíme k okrajům, tím více intenzita klesá. V podélném průřezu paprsku vytváří intenzita tvar Gaussovy křivky. Módová struktura má velký vliv na velikost stopy, kterou za sebou zanechává laserový paprsek.

Při řezání tenkých materiálů je požadován TEM 00, který zajišťuje výborné zaostření. Módem TEM 00 se vykazují především pevnolátkové lasery. Vzniká velmi úzká symetrická řezná spára. Příčné rozdělení energie je popsáno vztahem:

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{2r^2}{r_0^2}\right)} \text{ [W} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (1.2)$$

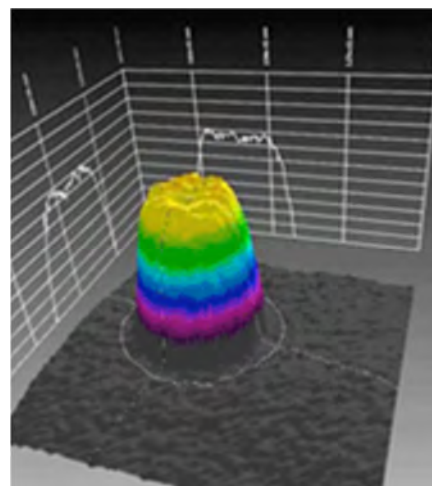
Kde: I - intenzita paprsku v závislosti na jeho radiálním rozměru [Wmm^{-2}],

I_0 - intenzita záření ve středu paprsku [Wmm^{-2}],

r - vzdálenost od osy paprsku [mm],

r_0 - identifikovaný poloměr paprsku [mm].

Dělení větších tlouštěk plechů, vyžaduje širší řeznou spáru, aby bylo zajištěno snadné vyfukování taveniny. V tomto ohledu mají výhodu CO₂ lasery disponující módem nazývaným Top hat, viz obr. č. 14. Příčný průřez intenzity záření má tvar obdélníka. Nemá žádný vrchol, jde hůře zaostřit. Výsledkem je širší řezná spára zabezpečující dobrý vstup, průchod plynu řeznou spárou a odvod taveniny.

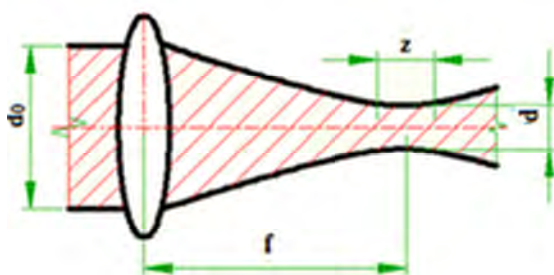


Obr. č. 14 Top hat [41]

Pro dosažení malé tepelně ovlivněné oblasti, úzké spáry a vysokého výkonu připadající na jednotku plochy požadované pro řezání a svařování materiálů je nutné laserový paprsek vystupující z rezonátoru zaostřovat. Na obr. č. 15 jsou zobrazeny nejdůležitější veličiny, které mají vliv při zaostření paprsku čočkou. Průměr stopy paprsku na povrchu materiálu lze vypočítat dle vztahu:

$$d = \frac{4f\lambda}{\pi d_0} = f\Theta \quad [mm] \quad (1.3)$$

Kde: d - průměr stopy zaostřeného paprsku měřený [mm],
 d_0 - průměr paprsku před čočkou [mm]
 f - ohnisková vzdálenost [mm]



d - je průměr stopy paprsku v ohniskové vzdálenosti čočky,
 d_0 - je průměr nezaostřeného paprsku,
 f - je ohnisková vzdálenost čočky,
 z - je hloubka ostrosti

Obr. č. 15 Zaostření paprsku čočkou [63]

Velmi často je zmiňován v souvislosti s kvalitou laserového paprsku parametr označovaný BPP (Beam Parameter Product), který popisuje schopnost paprsku být zaostřen do co nejmenší plochy. Je to parametr popisující kvalitu kruhově symetrických svazku, a tedy i kvalitu rezonátoru. U Gaussova rozložení svazku je dosahováno nejmenšího BPP. Tento parametr je určen součinem divergence, respektive polovičním úhlem a poloměrem paprsku měřeného v pasu. Čím je hodnota BPP menší, tím lépe lze paprsek zaostřit na stejnou hodnotu průměru d . Pro zaostření paprsku s malým BPP lze použít čočku s větší ohniskovou vzdáleností. Tento parametr laserového svazku zůstává neměnný i po zpracování optickou soustavou laseru. Vliv na něj má index lomu aktivního prostředí rezonátoru. S narůstajícím výkonem laserového paprsku se BPP zvyšuje a paprsek bude hůře zaostřitelný. V příloze č. 1 je závislost BPP jednotlivých typů laserů na výkonu. BPP lze určit ze vztahu:

$$BPP = \frac{d\Theta}{4} \quad [mm \cdot mrad] \quad (1.4)$$

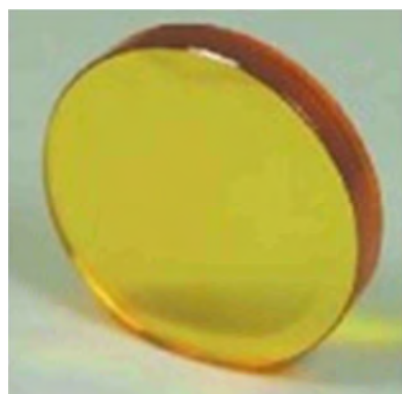
Kde: BPP - Beam Parameter Product [mm · mrad]

2.2 CO₂ lasery [1], [30], [32], [35], [40], [41], [57]

Jedná se o plynové lasery, které jsou buzeny elektrickým výbojem. Aktivní prostředí tvoří směs plynů: oxid uhličitý, dusík, hélium. Jako další plyny mohou být do směsi přidané vodík a xenon. Procentuální poměr plynů bývá různý. Nejvhodnější poměr plynů pro dosažení maximálního výkonu laseru se ukázal poměr CO₂: N₂: He = 1: 2: 8 při tlaku směsi plynu 1,5 kPa. Směs plynů je uzavřena ve skleněné trubici, která tvoří rezonátor CO₂ laseru. Při provozu dochází ke značnému zahřívání plynu. Je nutné jej chladit, aby nedošlo k poškození rezonátoru. Chlazení je zajištěno nucenou cirkulací plynu chladicím systémem. Vlivem netěsností soustavy a cirkulace plynu dochází postupem času k jeho úbytku, proto je plyn nutno doplňovat. U laserů, kde plyn proudí trubici podélným směrem, se používá k buzení doutnavý elektrický výboj. Pokud jde o laser s příčným prouděním plynu, je buzení realizováno vysokofrekvenčním výbojem.

Konstrukce s příčným prouděním plynu dovoluje konstruovat výkonnější lasery o výkonu až 200 kW. Běžně se výkony CO₂ laserů pohybují v rozmezí od 1 W do 20 kW. V porovnání s pevnolátkovými lasery dosahují CO₂ lasery mnohem větších výkonů, avšak mají nižší účinnost 10 - 20 % a vyšší provozní náklady.

Vyšší provozní náklady CO₂ laserů jsou zapříčiněny úbytkem plynu v aktivním prostředí, malou účinností, větší složitostí konstrukce a náročnější údržbou. Složitější je i doprava laserového paprsku do místa řezu. Laserový paprsek musí být dopravován speciální optickou soustavou. Čochy jsou vyrobeny ze speciálních materiálů, například z arsenidu galia, z germánia nebo mohou být zinkoselenidové, viz obr. č. 16. Zrcadla bývají vyrobeny z mědi a zlata.

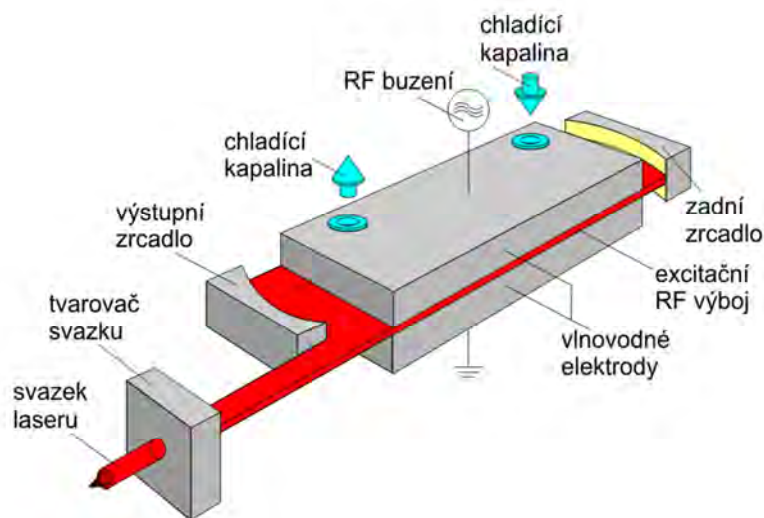


Obr. č. 16 ZnSe čočka [32]

Nejčastější generovaná vlnová délka laserového paprsku je 10,6 μm, méně častá pak 9,4 μm. Toto záření spadá do infračervené oblasti elektromagnetického záření. Vlnové délky CO₂ laserů mají horší absorpční schopnost, než je tomu u vlnových délek generující pevnolátkové lasery.

Kvůli nízké účinnosti musí být laser a hlavně aktivní prostředí intenzivně chlazen. Chlazení je zajišťováno nuceným prouděním plynu podélným nebo příčným, jak bylo zmíněno. U moderních

zařízení tzv. SLAB CO₂ laserů, viz obr. č. 17, je chlazení zajištěno difúzním způsobem. Teplo přechází do plochých měděných elektrod. U difúzního způsobu chlazení plyn neproudí. Díky tomu klesá spotřeba plynu v aktivním prostředí a tak se zvyšuje čistota prostředí. Nedochozí v takové míře ke kontaminaci optiky. Celkové náklady na provoz se snižují. Výkon těchto laserů dosahuje 8 kW.



Obr. č. 17 SLAB CO₂ laser [57]

2.3 Vlákňové lasery [1], [30], [40], [41], [57]

Vlákňový laser se řadí mezi pevnolátkové lasery. Aktivní prostředí tvoří tenké vlákno z křemenného skla o průměru několika mikrometrů a jeho délka se pohybuje v metrech. Tato konstrukce zajišťuje výborné chlazení aktivního prostředí a odstraňuje thermal leasing effect, který se vyskytuje u tyčového Nd-YAG.



Obr. č. 18 Princip vlákňového laseru [1]

Vlákňový laser vznikl nahrazením aktivního prostředí ve tvaru tyče Nd-YAG laseru vláknem, tím bylo dosaženo lepšího chlazení a kvality laserového paprsku. Chlazení vlákňového laseru je dokonce lepší než u diskového laseru. Aktivní prostředí tyčového laseru tvoří izotopní krystal Yttrium Aluminium granátu $Y_3Al_5O_{12}$ dopovaný ionty neodymu Nd^{3+} . U vlákňového laseru je křemíkové vlákno dopované prvky vzácných zemin ze skupiny lanthanoidů: ytterbium (Yb), erbium (Er) nebo thulium (Tm). Nejčastěji se využívá ytterbia. Prvek dopující vlákno má určující vliv na vyzařovanou vlnovou délku laserového paprsku, přehled vlnových délek je udán v tabulce č. 2.

Tab. č. 2 Vlnové délky vlákňového laseru dle dopujícího prvku [1]

Dopující prvek	Rozsah vlnových délek [μm]
Er	1,54 - 1,62
Tm	1,72 - 2,00
Yb	1,06 - 1,12

Dopující prvek je umístěn v jádře vlákna. Čerpání energie zajišťují laserové diody. Paprsek diod je zaostřen na plášť vlákna. Plášť se chová jako odrazivé zrcadlo rezonátoru, viz obr. č. 18. Takto je nastartována stimulovaná emise záření. Paprsek se odrazy šíří celým vláknem, na konci je jednoduchou optickou soustavou zpracován a převeden do optického vlákna, které ho dále vede do místa řezu nebo do pracovní hlavy laserového zařízení. Je dosahováno velmi vysoké účinnosti až 70 %.



Obr. č. 19 Vlákno vlákňového laseru [57]

Výkon získaný z jednoho vlákna činí 500 W. Na obr. č. 19 je zobrazeno vlákno vlákňového laseru. Díky vysoké účinnosti vzniká menší množství tepla a snižují se nároky na chlazení. Vlákno je chlazené vzduchem nebo vodou. Větších výkonů dosahujeme skládáním většího počtu vláken. Výstupní paprsky jednotlivých vláken se pomocí optické soustavy spojí a opět zavedou do vodícího optického vlákna. Výkony vlákňových laserů pro průmyslové aplikace se pohybují od 2 kW do 20 kW. Tyto typy laserů dosahují výborných výsledků při řezání a svařování hliníku, mědi a jejich slitin, dále jsou vhodné zejména pro řezání tenkých ocelových plechů. V poslední době patří mezi nejpoužívanější lasery pro řezání materiálů, protože jsou velmi kompaktní a mají malé nároky na údržbu.

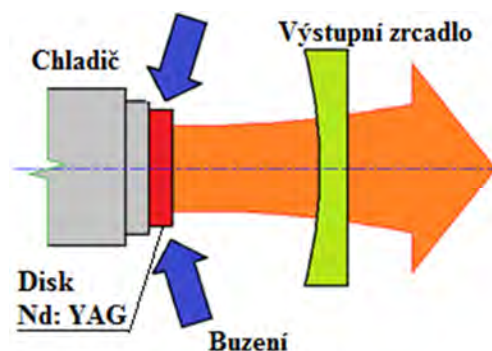
2.4 Diskové lasery [1], [40], [41], [57]

Diskový laser patří mezi pevnolátkové lasery. Krystal aktivního prostředí má válcovitý tvar o průměru 100 mm a tloušťku několik desetin mm. Buzení probíhá laserovou diodou. Tento disk je nalepen jednou stranou na kontaktní chladič, který ochlazuje aktivní prostředí. Chlazení probíhá u menších výkonů pouze vzduchem u větších je zajištěno vodou. Teplota v krystalu je rozložena homogenně díky jeho tenké tloušťce. Schéma diskového laseru je vidět na obr. č. 20.

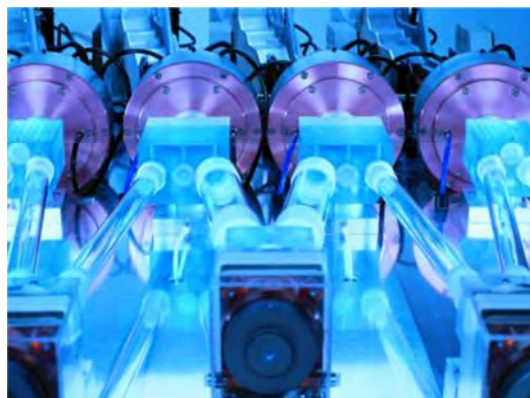
Je dosahováno velké kvality laserového paprsku, velmi dobré jemnosti zaostření a hloubky ostrosti. Vlnová délka vyzařovaného laserového paprsku je 1,03 μm a 0,515 μm . Velkou výhodou podobně jako u vláknového laseru je stabilita kvality paprsku i se zvyšujícím se výkonem. Tato skutečnost umožňuje zvyšovat pracovní rychlost a tím minimalizovat tepelné ovlivnění materiálu.

Diskové lasery jsou vhodné pro řezání materiálu s velmi úzkou řeznou spárkou, pro svařování s malou tepelně ovlivněnou oblastí. Mohou být použité pro aplikace, jako je povrchové kalení nebo navařování prášků. Systém povrchového kalení může být vyřešen rozkmitáním laserového paprsku s vysokou frekvencí. Rozkmitaný paprsek pak zabírá svou šířkou i několik centimetrů povrchu. Výkony těchto laserů se běžně pohybují do 8 kW, možné jsou však i varianty o výkonu 25 kW. Na obr. č. 21 je vidět buzení diskových laserů pomocí laserové diody. Pro buzení diskového laseru je potřebné vícenásobný průchod záření laserové diody přes reflektující vrstvy jedné strany kotouče a okolních reflektorů.

Perspektiva použití těchto laserů je v oblasti svařování mědi, která je těžko svařitelná a při konstrukci přeplátovaných měděných spojů. Diskové lasery dosahují také velmi dobrých výsledků při řezání skla.



Obr. č. 20 Schéma diskového laseru [1]



Obr. č. 21 Buzení diskového laseru [57]

2.5 Porovnání CO₂ a vláknového laseru [54], [66], [67]

Pro laserové řezání kovů jsou nejvíce používány CO₂ a vláknový laser. Oba typy laserů mají své výhody a nevýhody. Přednosti CO₂ laseru spočívají především ve schopnosti řezat kovy v širokém rozsahu tlouštěk s dobrou kvalitou řezu. Vláknový laser je kompaktnější, má jednodušší konstrukci, nižší provozní náklady a lepší výkonové charakteristiky. Umožňuje rychlejší řezání tenkých plechů do 4 mm tloušťky. Srovnáním obou typů laserů při řezání tlustších plechů za stejné řezné rychlosti zjistíme, že CO₂ laser dosahuje menší drsnosti řezného povrchu. Příčiny těchto rozdílů jsou intenzivně zkoumány za účelem dalšího vývoje vláknového laseru, který je v současné době nejvíce využívaný pro laserové řezání.

Jedna z možných příčin rozdílu v kvalitě řezu může být různý koeficient absorpce jednotlivých vlnových délek laserů a úhel dopadu laserového paprsku na řezné frontě. Ve světě proběhlo několik experimentů za účelem zkoumání rozdílů při řezání vláknovým a CO₂ laserem. Výsledky těchto experimentů byly prezentovány na osmé mezinárodní konferenci fotonických technologií. Mezi prezentovanými byl experiment srovnávání řezných podmínek, které byly nastaveny tak, aby lasery řezaly s co nejmenší drsností povrchu.

V prezentovaném experimentu byly řezány vláknovým laserem plechy z oceli S235J0 o tloušťce 3; 5 a 10 mm. CO₂ laserem byly řezány plechy o tloušťce 5; 10 a 16 mm. Tlak kyslíku byl 2,5 baru u plechů o tloušťce 3 mm a 0,05 barů pro ostatní tloušťky plechů. Tento tlak byl volen tak, aby bylo dosaženo co nejmenší drsnosti řezného povrchu.

Jako řezné parametry byly voleny optimální hodnoty řezné rychlosti, polohy ohniska a výkonu laseru. Tyto optimální parametry byly vybrány, aby vykazovaly co nejmenší možnou drsnost řezu. Výběr parametrů proběhl ve dvou fázích.

Nejdříve byla k danému výkonu určena optimální poloha ohniska, poté byla nalezena optimální řezná rychlost označená jako ' V^* '. Poloha ohniska má přímý vliv na šířku řezné spáry. Optimální šířka řezné spáry je označovaná jako ' b^* '.

Při oxidačním řezání nízkouhlíkové oceli bylo dosaženo minimální drsnosti povrchu řezů pro široký rozsah řezaných tlouštěk plechů oběma typy laserů. Minimální drsnost povrchu vznikala při stejném množství vnesené energie připadající na jednotku objemu materiálu odstraněného z řezné spáry. Tato hodnota vneseného výkonu se pro oba typy laserů rovná 11 až 13 J/mm³. Samotné hodnoty minimálních drsností u jednotlivých typů laserů se však lišily. Například pro plech o tloušťce 5 mm bylo dosaženo u CO₂ laseru minimální drsnosti Rz = 10 μm, u vláknového laseru bylo dosaženo Rz = 25 μm. Nejmenší drsnosti řezu bylo dosaženo při hodnotě Pecletova čísla 0,35 - 0,4 pro vláknový laser a u CO₂ laseru 0,45 - 0,55. V příloze č. 2 je závislost Pecletova čísla na bezrozměrném vneseném výkonu. V této závislosti lze vidět, že nejmenší drsnost se pohybuje v jednom místě pro vláknový laser a zároveň překrývá oblast nejmenší drsnosti pro CO₂ laser. To potvrzuje zjištěný fakt o stejné hodnotě vneseného výkonu. Pecletovo číslo je optimalizováno řeznou rychlostí, šířkou řezné spáry. Je definováno vztahem:

$$Pe = \frac{V^* \cdot b^*}{D} \quad [-] \quad (1.5)$$

Kde: b^* - optimální šířka řezné spáry [m],

D - koeficient difuze [m² · s⁻¹],

Pe - Pecletovo číslo [-],

V^* - optimální řezná rychlost [m · s⁻¹].

Bezrozměrný vnesený výkon se určí ze vztahu:

$$Pe^* = \frac{AW}{kaT} \quad [-] \quad (1.6)$$

Kde: A - součinitel absorpce [-],

a - tloušťka materiálu [mm],

k - součinitel tepelné vodivosti materiálu [K⁻¹],

Pe - bezrozměrný vnesený výkon [-],

T - teplota tavení materiálu [K],

W - výkon laseru [W].

Se zvyšujícím se výkonem laseru klesá koeficient absorpce během řezání u vláknového laseru z 95 % na 25 %, u CO₂ laseru je pokles nižší ze 75 % na 55 %. Naměřená absorpce 95 % je poměrně vysoká hodnota, příčinou mohou být nehomogenity v důsledku nestability toku taveniny a několikanásobné odrazy laserového paprsku od přední a bočních stěn řezné spáry. Největší absorpce je v řezné frontě řezu, u oxidačního řezání ji zvyšuje vznik vrstvy oxidů, které mají větší součinitel absorpce než samotný řezaný kov.

Při tavném způsobu byly vzorky řezány z materiálu 12X18H10T. Použitý výkon byl u obou laserů 2 kW. Experiment probíhal podobným způsobem, jak u oxidačního řezání. Tlak dusíku byl 1,3 - 1,6 MPa. Pro použité lasery se lišil charakter rozložení drsnosti. Na ploše řezu byla při řezání u obou laserů pozorována hloubková nehomogenita Ra parametru drsnosti. Nehomogenita byla téměř dvojnásobná. Pro vyhodnocení bylo nutné brát průměrné hodnoty drsnosti měřené v různých výškách řezné hrany.

Průměrná drsnost je větší se snižující se rychlostí. Pokud se rychlost zvyšuje, snižuje se drsnost řezu do určité hodnoty, pak dochází k podřezávání. Hodnoty průměrné drsnosti pro oba lasery jsou přibližně stejné při použití optimální polohy ohniska a řezné rychlosti. Optimální řezná rychlost vláknového laseru je přibližně 1,5 - 2 krát větší než u CO₂ laseru.

V příloze číslo 3 je zobrazena závislost průměrné drsnosti řezné plochy na řezné rychlosti pro tloušťku plechu 3 mm. Vnesená energie na jednotku objemu odebraného materiálu z řezné spáry se u tavného řezání pohybovala pro vláknový laser 26 - 32 J/mm³ a pro CO₂ laser 42 - 66 J/mm³, viz příloha č. 4. Hustota vnesené energie závisí jen slabě na Pecletovu čísle, nejvíce je ovlivněna stupněm přehřátí taveniny. Zveřejněný experiment jasně ukazuje přednosti vláknového laseru a zároveň odhaluje vztah pro nastavování řezných parametrů, tak aby byla dosažena co nejlepší kvalita řezu.

2.6 Oxidační řezání [1], [7], [25], [53], [66], [67]

U metody oxidačního laserového řezání je použit jako procesní plyn kyslík. Kyslík způsobuje částečné spalování materiálu při řezání. Kvalita řezu je většinou horší než u tavného řezání, protože se na řezné hraně tvoří oxidy. Pokud dělíme ocel, probíhá zde stejná exotermická reakce jako u řezání kyslíkem. Tato reakce se chová jako další zdroj energie. Energie uvolněná z exotermické reakce kovu a kyslíku je pětkrát větší než energie laserového paprsku. Jde tedy o velmi významný zdroj energie, který má velký vliv na utváření řezné plochy. Díky tomu klesají nároky na výkon laseru. Tlak kyslíku je poměrně nízký, pohybuje se cca 3 - 5 barů. Spotřeba plynu je menší než u tavného způsobu řezání. Ohnisko laserového paprsku je zaostřeno pod povrch horní plochy řezaného materiálu, viz obr. č. 22.

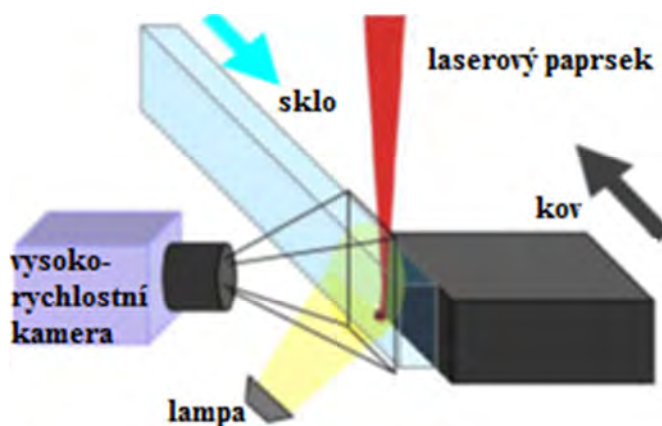


Obr. č. 22 Ohnisko - oxidační řezání [1]

Oxidační řezání se uplatňuje hlavně při dělení uhlíkových ocelí, nízkolegovaných ocelí a titanu. Lze jej použít i pro dělení korozivzdorné oceli, přičemž musíme počítat s tvorbou tvrdých oxidů legujících prvků, například chromu, který je velmi tvrdý a špatně odstranitelný. Řezné rychlosti jsou většinou vyšší než tavného způsobu řezání. Pomocí oxidačního laserového řezání lze efektivně a rychleji řezat tloušťky až do 25 mm s menší energetickou náročností než tavným způsobem. Oxidační řezání je velmi citlivé na stav povrchu plátu plechu a na čistotu kyslíku.

Mnoho jevů pozorovaných při procesu oxidačního řezání, které ovlivňují kvalitu řezu, není dostatečně popsáno a vysvětleno. Proto proběhlo ve světě několik již zmíněných experimentů, které se mimo jiné zabývaly i touto problematikou. Laserové oxidační řezání bylo pozorováno pomocí vysokorychlostní kamery za účelem získat více experimentálních poznatků a dat.

Snímání probíhalo pomocí vysokorychlostní kamery se snímkovací frekvencí 10000 snímků za sekundu. Jedna stěna řezné spáry byla nahrazena průhledným sklem. Aby si sklo zachovalo průhlednost v okolí, kde je materiál taven, pohybuje se vzhledem ke kovu několikanásobně větší rychlostí. Tak je minimalizováno tepelné zatížení. Plát kovu se pohybuje na opačnou stranu než sklo. Laserový paprsek stojí na místě, stejně tak i vysokorychlostní kamera. Ta je stále namířená na místo dopadu laserového paprsku.



Obr. č. 23 Schéma vysokorychlostního snímání [66]

Při snímání byl vzorek osvětlen velkou intenzitou světla vycházející z halogenové lampy. Schéma snímání je zobrazeno na obr. č. 23. Řezné podmínky byly voleny tak, aby co nejvíce odpovídaly podmínkám běžně volených v průmyslové výrobě.

Pomocí vysokorychlostní vizualizace byl pozorován fyzikální princip oxidačního řezání nízkouhlíkových ocelí. Bylo vyzpozorováno, že při oxidačním řezání se vytváří dvě řezné fronty. První fronta je tvořena oblastí dopadu laserového paprsku, kde dochází k jeho maximální absorpci. Laserový paprsek ohřívá řezaný kov, tím iniciuje vznik druhé fronty, kterou tvoří spalovací vlna exotermické reakce kovu s kyslíkem. Tato reakce může být rychlejší jak laserový paprsek a může jej předbíhat. Pokud spalovací vlna předbíhá laserový paprsek, je utvářecí mechanismus rýh na řezné ploše tvořen cyklickým spalováním kovu. Spalovací fronta se oddělí od fronty laserového paprsku, zanechává ho za sebou, dosahuje nezahřátého kovu a zaniká. Pak se celý proces opakuje.

Pokud spalovací vlna nepředbíhá laserový paprsek, nedochází ke spalovacím cyklům, ale spalování kovů probíhá bez přerušení. Intenzita exotermické reakce je omezená přenosem kyslíku z kyslíkové trysky na spalovací frontu. Proces oxidačního řezání byl numericky simulován, výstup ze simulace a popis procesu simulace je v příloze č. 5. Stejný proces, který vytvořila simulace, byl pozorován při řezání vláknovým laserem s nízkou řeznou rychlostí u 4 mm tlusté oceli. Simulace se ve srovnání s experimentem lišila, v iniciaci nové spalovací vlny, která v experimentech proběhla nejen na vrchní oblasti řezu, ale někdy i na boční stěně řezu. Spalovací vlna byla zažehnutá na boční straně řezu a to v případě, že předcházející vlna posunula řeznou frontu vpřed o dostatečnou vzdálenost.

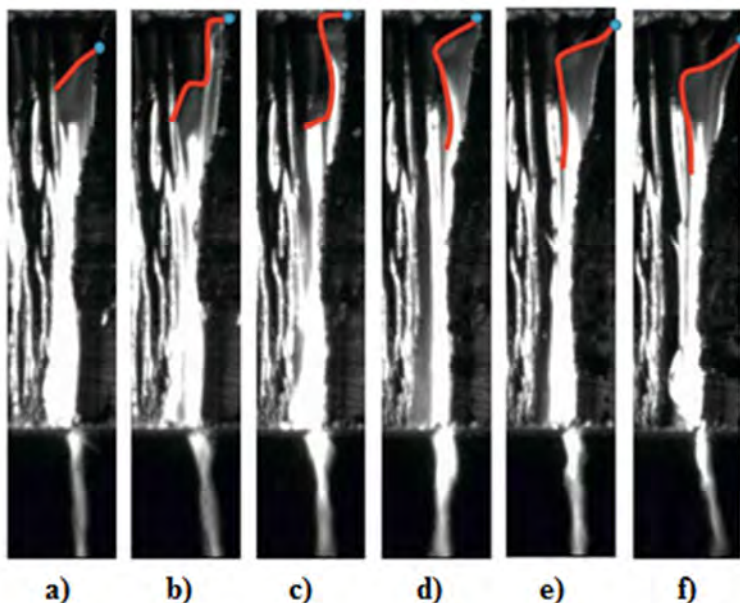
Zpravidla vlna zažehnutá daleko od řezné fronty rychle uhasíná. Při řezání nedochází k žádnému hromadění tlusté vrstvy či kapek oxidu v řezné frontě. Tloušťka tekuté vrstvy se zdá být mnohem menší než tloušťka zářezu nebo velikost rýh. Modelovat pomocí simulace bylo možné jen několik horních milimetrů řezné fronty, kde jsou vhodné předpoklady:

- Množství taveniny není dostatečné k tomu, aby ovlivnilo přenos tepla ve vertikálním směru.
- Šíření řezné fronty je omezené procesem vedení tepla v pevném kovu.

Na obr. č. 24 jsou snímky při snímání procesu řezání vláknovým laserem pro 4 mm tlustý plát ocelového plechu z uhlíkové oceli. Na těchto snímcích stejně jako u simulace byl pozorován opakující se cyklus vytváření řezných front. V horní části zářezu se přerušovaně objevuje pohybující se svítící oblast, která je identifikována jako spalovací vlna. Počáteční bod spalovací vlny je označen modrou tečkou. V tomto časovém bodě není pozorována intenzivní luminiscence blízko vrchního povrchu plechu.

Na obr. č. 24 na snímku b), je vidět zažehnutí nové spalovací vlny na horním povrchu plechu. Šíření spalovací vlny probíhá na vrchním povrchu a poblíž něj, viz snímek b) až d). Při simulaci se šíření spalovací vlny blížilo radiálnímu směru osy z.

Rychlost šíření spalovací vlny je možné měřit od bodu pohybu fronty, v tomto experimentu je okolo 30 – 40 mm/s. Šíření spalovací vlny můžeme považovat za radiální. Vychýlení řezné fronty napravo značí, že rychlost řezné fronty je vyšší jak rychlost posuvu materiálu. Na obr. č. 24 snímek d) je vidět začínající reakce spalovací vlny, která následně pokračuje na vrchním povrchu plechu a dále se pohybuje směrem dolů, viz snímek e), f). Reprezentativní frekvence zážehových cyklů je kolem 100 Hz při řezné rychlosti 20 mm/s, proto jsou rýhy přibližně 0,2 mm široké.



Obr. č. 24 Dynamika tvorby řezné spáry u vláknového laseru [67]

Zajímavým výsledkem je fakt, že vytvořený tok taveniny oxidu železa je stlačen silou povrchového napětí taveniny a odebrán směrem dolů asistenčním plynem ve formě tenkého proudu. Stejnou cyklickou tendenci ve svítící oblasti vykazovala i simulace děje. Simulace se také shoduje s výskytem dvou fází a rychlostí šíření spalovací vlny.

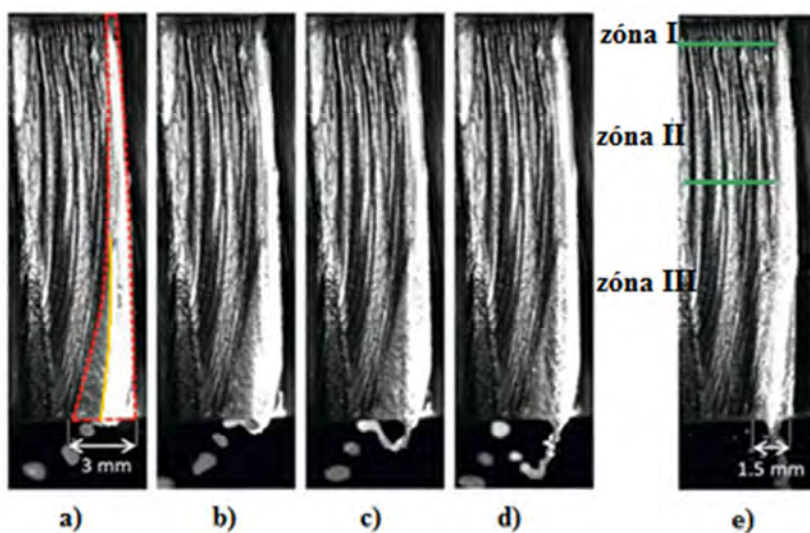
Ve výsledku může být proces oxidačního řezání charakterizován jako vynucené spalování železa a šíření řezné fronty. Ta se vyskytuje ve formě cyklické spalovací vlny. Čelo řezu se periodicky odděluje od čela paprsku, z toho důvodu čelo řezu netvoří laserový paprsek, ale exotermická reakce spalování železa. Tato reakce je hlavní iniciátor vzniku a formování řezné spáry.

Pro pochopení procesu oxidačního laserového řezání a následného vytvoření přesné simulace, která by byla dále využívána v praxi a ve výzkumu, je základní problém výpočet intenzity chemické reakce. Limitující faktor pro reakci je přenos kyslíku z trysky do řezné fronty, s množstvím kyslíku souvisí jeho tlak. Byla prokázána vysoká citlivost na čistotu kyslíku. I malé množství inertních nečistot omezuje přístup kyslíku k frontě řezu.

Vysoká citlivost intenzity reakce na čistotu kyslíku je vysvětlována utvářením hraniční podvrstvy tvořené inertní nečistotou. Kyslík musí proniknout k reakčnímu povrchu kovu skrze tuto tenkou vrstvu. Bylo zjištěno, že pokud je použit kyslík o čistotě nižší než 99,5 %, poblíž řezné fronty se vytváří podvrstva vyplněná inertním plynem. Rychlost reakce je determinována rychlostí pronikání kyslíku skrz tuto podvrstvu. Pokud je čistota kyslíku vyšší než 99,5 %, potom je tloušťka inertní podvrstvy tak malá, že rychlost reakce je determinována rychlostí přívodu plynu k řezné frontě.

Koncentrace kyslíku vyšší než 99,99 % je dostatečná k tomu, aby se nevytvořila inertní podvrstva. Reakční rychlost je pak určena výlučně účinky dynamiky plynu uvnitř řezné spáry. Další nárůst čistoty kyslíku nevede k žádnému znatelnému nárůstu reakční rychlosti.

V příloze č. 6 je numerické popsání vlivu čistoty kyslíku na intenzitu reakce. Je důležité zmínit, že délka účinku intenzivní chemické reakce je omezená na 5 - 6 mm od vrchní hrany řezu. Podle dosavadních závěrů nelze tuto délku příliš změnit pomocí jiné geometrie ústí trysky, tlaku kyslíku ani tloušťkou plechu. Délka intenzivní reakce může být jedním z omezujících faktorů pro proces oxidačního laserového řezání.

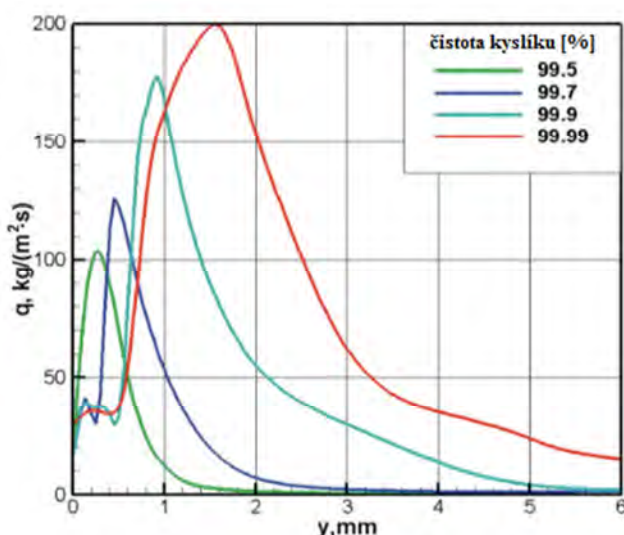


Obr. č. 25 Řezání 20 mm uhlíkové oceli CO₂ laserem [67]

Dle vysokorychlostního snímání laserového oxidačního řezání tlustých plechů je možné rozdělit řeznou plochu do tří zón podle charakteru pozorovaných účinků, viz obr. č. 25 snímek e). Tento snímek byl pořízen při experimentálním řezání CO₂ laseru o výkonu 4 kW, řezné rychlosti 0,7 m/min, tlaku kyslíku 0,6 baru, průměr ústí trysky byl 2 mm a odstup trysky od plechu 1 mm. Pozice ohniska se nacházela na vrchním povrchu. Snímky jsou pořízeny v intervalu 1,5 ms. Časový interval mezi prvním a pátým snímkem je 80 ms.

Hranice mezi zónami nejsou striktně určeny. Horní zóna I dosahuje rozsahu od 0 do 1 mm od horní hrany řezu. Střední zóna II se pohybuje v rozsahu od 1 mm do 8 mm, od střední zóny níže je dolní zóna. Spalovací vlny pravidelně vznikají v horní zóně řezu a tvoří rýhy tak, jak je tomu u tenkých plechů viz obr. č. 24.

Délka horní zóny může být určována dvěma procesy: tepelnou vodivostí kovu v pevném stavu a účinkem nízké úrovně v reakční intenzitě na vstupu. Další rozšiřování spalovacích vln dolů po řezné frontě v zóně II je méně pravidelné, některé vlny jsou tlumené, jiné zesílené. V dolní zóně je proces stabilizovaný, řezná fronta se vyhlazuje. Tvorba rýh, způsobená spalovacím procesem, se odehrává v oblasti, kde je pro reakci dostupný kyslík z trysky. Hloubka rýh u střední zóny II intenzivním spalováním je blízká hloubce přenosu kyslíku z trysky do řezné fronty, viz obr. č. obr. 26.



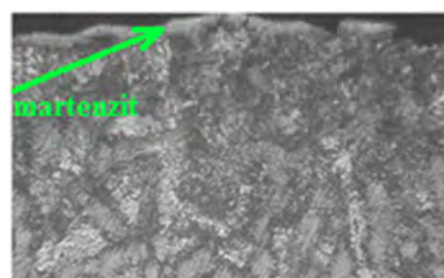
Obr. č. 26 Hloubka přenosu kyslíku z trysky [67]

V horní části řezu jsou pravidelné malé rýhy, které se spojují do větších a chaotičtějších rýh směrem dolů podél řezu mezi 8 - 20 mm. Oblast pokrytou tekutým materiálem vyznačuje na obr. č. 25 snímku a) červená přerušovaná čára.

V zóně okolo 6 - 8 mm blízko dolní části řezu je tok tání velmi široký a tavenina je rozprostřena, netvoří silnou vrstvu. Tok taveniny je široký 3 mm. Po uplynutí zhruba 0,08 s se zužuje na 1,5 mm, viz obr. č. 25 snímek e). Při takto dlouhé době oscilace toku taveniny jsou produkovány rozměrné rýhy na stěně řezu.

Tok taveniny v této oblasti je možné rozdělit do dvou částí. Hranice je vyznačena žlutou čarou na obr. č. 25 snímku a). Boční oblast stěny řezu je málo osvětlená. To může naznačovat, že teplota povrchu je mnohem menší než v řezné frontě. Tloušťka tekuté vrstvy se zdá být malá. Druhá střední část toku je umístěna blízko řezné fronty a je vysoce osvětlená. Lze usuzovat, že teplota taveniny v tomto místě je mnohem vyšší než na bocích. Hraniční linie mezi těmito částmi toku taveniny je vždycky zřetelně rozeznatelná. Únik taveniny z řezu probíhá jenom z vysoce osvětlené oblasti. Charakter dlouhodobého kolísání toku taveniny v této zóně je neznámý a podle všeho je omezujícím faktorem při řezání tlustých plechů, pokud je cílem dosáhnout dobré kvality řezu. Další omezující faktor je metalurgická interakce uhlíku a oxidu železa s kovem.

Některé z jevů metalurgické interakce probíhající při řezném procesu jsou prezentovány v příloze č. 7. Snímky byly pořízeny při běžných podmínkách řezání metodou SEM (Scan Electron Microscope). Jsou zde zachyceny uhlíkové částice zamrzlé ve vrstvě oxidu a další známé řezné efekty kyslíkového řezání, jako je tvorba martenzitové vrstvy a karbonizace. Martenzitová vrstva označená bíle může být 10 - 50 μm tlustá, viz obr. č. 27. Tloušťka vrstvy závisí hlavně na tloušťce plechu.



Obr. č. 27 Martenzitová vrstva na řezné hraně [67]

Tok taveniny a metalurgická reakce mohou být klíčovými body pro další rozvoj této technologie oxidačního řezání.

2.7 Tavné laserové řezání [1], [7], [25], [46], [53], [61], [66]

Princip tavného způsobu řezání je založen na použití dusíku nebo argonu jako procesního plynu. Jedná se o inertní plyny, které chrání řez proti oxidaci.

Působením laserového paprsku vzniká tavenina kovu, která je vyfukována směrem dolů. Inertní plyn musí mít odpovídající tlak 10 - 20 barů, aby byl schopen vyfouknout taveninu z řezné spáry a nedocházelo k jejímu ulpívání na spodním okraji řezaného materiálu. Použité tlaky jsou poměrně vysoké, to se promítá na zvýšené spotřebě plynů.



Obr. č. 28 Ohnisko - tavné řezání [1]

Určující vliv na volbu tlaku pracovního plynu má hlavně viskozita taveniny.

Ohnisko laserového paprsku je zaostřeno na spodní plochu řezaného materiálu, viz obr. č. 28. Potřebné výkony pro řezání jsou vyšší ve srovnání s oxidačním řezáním. Tavným způsobem laserového řezání dělíme materiály, které jsou schopné vytvořit taveninu. Jsou to zejména tyto materiály:

- uhlíková a nelegovaná ocel,
- barevné kovy,
- plasty,
- sklo a keramika.

Výhoda této metody je neoxidovaná řezná hrana s kvalitním povrchem. Tavné řezání má oproti oxidačnímu způsobu většinou nižší řezné rychlosti a řeznou plochu bez oxidů. Nejvíce se používá u řezání nerezových ocelí, hliníku, mědi, mosazi a pozinkovaného plechu.

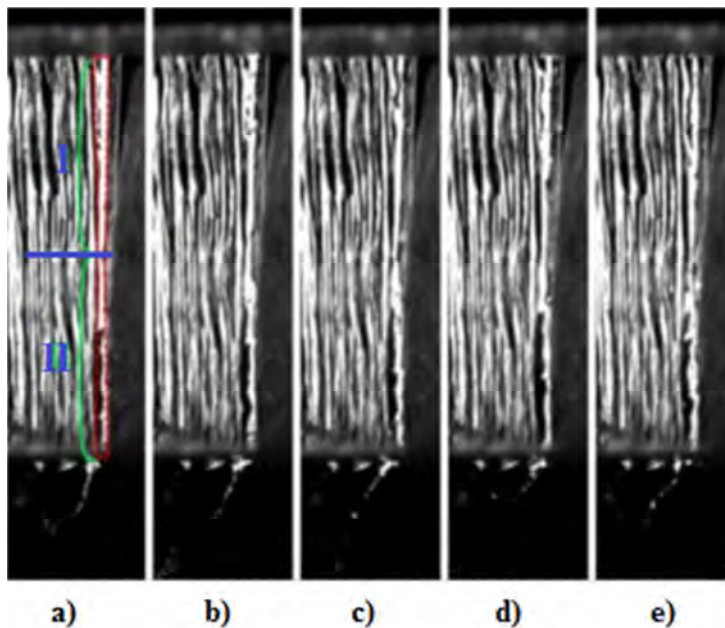
Řezání s inertním plynem se významně liší od oxidačního řezání, protože zde není navíc zdroj energie, který u oxidačního řezání tvoří exotermická reakce. Úběr materiálu na čele řezu a v místě šíření způsobují jiné mechanismy. Pomocí vysokorychlostního snímání, podobně jak je popsáno u oxidačního způsobu řezání, byl sledován i tavný proces laserového řezání.

Utváření řezné spáry a zařezávání je během procesu cyklické. V počátku cyklu ohřívá přední část paprsku povrch před řeznou frontou na teplotu tavení. Při kolmém dopadu paprsku na řeznou frontu je absorpce nerezové oceli mnohem vyšší u vláknového laseru než u CO₂ laseru. Pro vlnovou délku CO₂ laseru $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ činí koeficient absorpce při normální teplotě 2 – 5 %, tato hodnota stoupá k 10 %, když je materiál ohřátý na teplotu 1000°C. Koeficient absorpce u vláknového laseru pro vlnovou délku $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ je za normální teploty 30 %, proto jen slabě závisí na teplotě.

Povrch tělesa je ohříván laserovým paprskem. Při zvyšování řezné rychlosti klesá intenzita ohřevu povrchu. Pokud rychlost dosáhneme určité hodnoty, klesne teplota povrchu natolik, že vymizí podmínky pro vznik řezné spáry. Příčinnou je pokles teploty pod teplotu tavení řezaného materiálu. Při stejném výkonu laserů je možné u vláknového laseru použít až dvakrát vyšší rychlost před výskytem tohoto jevu než u CO₂ laseru. U vláknového laseru není absorpce tolik závislá na teplotě povrchu. Právě tato skutečnost může být příčinou omezení rychlosti při řezání CO₂ laserem u tenkých plechů.

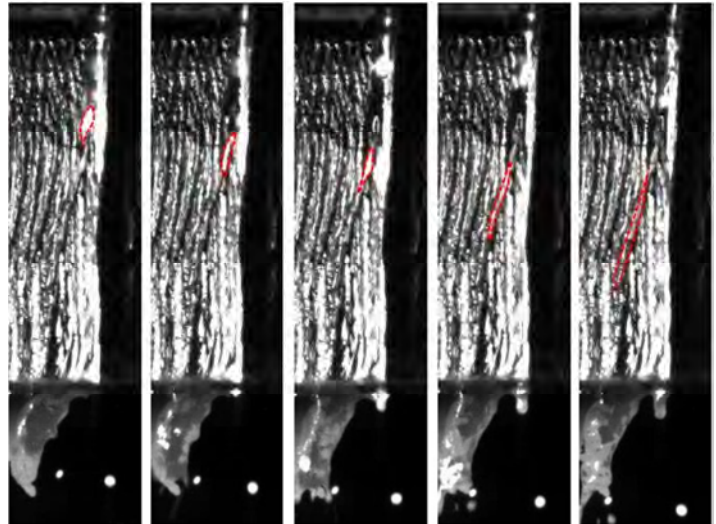
U CO₂ laserů při tavném řezání vytváří tekutý kov, jednoduchý dobře vyvinutý tok taveniny, který se nachází na přední straně řezné spáry, viz obr. č. 29. Snímky jsou pořízeny při řezání nerezové oceli o tloušťce 6 mm, řezanou při výkonu 2 kW. Tlak dusíku byl 14 barů. Průměr trysky je 3 mm, její odstup je 1 mm, ohnisko je 4 mm pod horním povrchem. Interval mezi snímky 0,5 ms. Všechna tavenina se nachází blízko místa řezu. Linie, kterou utváří kontakt taveniny a tuhého kovu, je jednoznačně rozeznatelná a poměrně stabilní, viz obr. č. 29 snímek a). Povrch, ze kterého odteče tavenina, je hladký. Nestabilita toku taveniny je vyjádřena ve formě jednoduchých vln na povrchu hlavního rýhování při horní části řezné spáry, viz obr. č. 29 snímek a) vrchní část označená I.

Jednoduché vlny se pohybují směrem dolů. Zatímco množství roztaveného kovu roste, povrch celého filmu taveniny se stává vysoce rozrušený, viz obr. č. 29 snímek a) část II. Hranice taveniny a pevného kovu jsou velmi dobře zřetelné a stabilní. Průtok se zdá být zúžený a lokalizovaný na přední části řezu, to je způsobeno silami povrchového napětí bránící jeho rozdělení.



Obr. č. 29 Tok taveniny u tavného řezání pro CO₂ laser [66]

Tok taveniny při tavném řezání vláknovým laserem je velmi nestabilní. Nejsou zde žádné stále hranice mezi taveninou a tuhým kovem. Tok je charakterizován více proudy taveniny na stěnách řezné spáry. Kontakt pevného a tekutého kovu je na obr. č. 30. Jedná se opět o snímky nerezové oceli o tloušťce 6 mm, výkon laseru byl 2 kW, tlak dusíku 14 barů, průměr trysky 3 mm, odstup trysky byl 1 mm a ohnisko 4 mm pod vrchním povrchem. Interval mezi snímky 0,15 ms. Vytékající tavenina se spojuje v přímý proud na řezném povrchu, typická šířka výtoku je 20 μm. Délka dráhy taveniny může dosáhnout několika milimetrů a rychlost vytékání je 10 m/s. Podobný jev může vzniknout, pokud teplota stěny je blízko teploty tavení nebo přehřátí taveniny a povrchové síly brání rozdělení toku taveniny.



Obr. č. 30 Tok taveniny u tavného řezání vláknovým laserem [66]

Data a skutečnosti získané pozorováním v popisovaných experimentech patří mezi nejnovější poznatky na poli zkoumání laserového řezání. Poodhalují hlavní faktory, které mají limitující vliv na laserový řezný proces a tak udávají směr dalšího výzkumu. Poskytují také výrazné množství dat pro vytvoření přesnějších simulací řezného procesu.

2.8 Řezné parametry a kvalita řezu [1], [2], [7], [11], [15],[24], [28], [33], [44]

Na výslednou kvalitu laserového řezání má vliv mnoho faktorů, které vstupují do řezného procesu. Mezi důležité faktory patří vlastnosti materiálu, vlastnosti a parametry laserového paprsku a řezné parametry.

Významné faktory materiálu ovlivňující kvalitu řezání jsou řezaná tloušťka, povrch a geometrie polotovaru, chemické složení materiálu, viskozita taveniny, schopnost absorpce, tepelná a elektrická vodivost materiálu.

Absorpce je schopnost daného materiálu pohlcovat záření laserového paprsku a přeměňovat jej na teplo. V oblasti nižších intenzit výkonů laserového paprsku do 10^6 Wmm^{-2} závisí na elektrické vodivosti materiálu. Materiál s malou elektrickou vodivostí má lepší absorpci. Absorpce je vyjadřována součinitelem absorpce, který je bezrozměrný. Někdy se uvádí místo součinitele absorpce součinitel odrazivosti. Vztah mezi jednotlivými součiniteli:

$$A = 1 - R_f \quad [-] \quad (1.7)$$

Kde: A - součinitel absorpce [-]

R_f - součinitel odrazivosti [-]

Závislost elektrické vodivosti na odrazivosti popisuje vztah:

$$R = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon-1}}{\sqrt{\varepsilon+1}} \right| = 1 - \sqrt{\frac{2\nu}{\pi\sigma}} \quad [-] \quad (1.8)$$

Kde: ε - dialektická permeabilita [$H \cdot m^{-1}$],

σ - elektrická vodivost materiálu [Ω^{-1}],

ν - frekvence dopadající záření [Hz].

Při interakci laserového paprsku s povrchem materiálu vzniká elektrický proud. Při průchodu elektrického proudu dochází k zahřívání. Čím horší má materiál elektrickou vodivost, tím více se ohřívá. Nejvhodnější pro laserové opracování je špatně elektricky a tepelně vodivý materiál, protože vzniklé teplo zůstává v místě řezu. Tak dochází ke snížení potřebného množství vneseného tepla do materiálu při procesu řezání, to vede i ke snížení potřebného výkonu laseru pro řezání.

Na schopnost absorpce mají také vliv samotné vlastnosti laserového záření. Absorpci nejvýznamněji ovlivňuje vlnová délka. V příloze 8 je graf, který srovnává absorpci vybraných materiálů při teplotě 20°C v závislosti na vlnové délce. Lepší absorpce se dosahuje při kratších vlnových délkách elektromagnetického záření. V tomto ohledu mají výhodu pevnolátkové lasery (vláknové a diskové), které generují vlnové délky přibližně desetkrát menší, než CO₂ lasery.

Absorpce materiálu se zvyšuje se stoupající teplotou povrchu materiálu. Pokud je ohřev povrchové vrstvy dostatečně rychlý, dochází ke snižování vlivu elektrické vodivosti na absorpci při hustotě výkonu 10⁷ Wmm⁻² a více. Vlivem prudce vzrůstající teploty se zvyšuje absorpce i u větších vlnových délek. V příloze 9 je znázorněna závislost absorpce na teplotě pro pevnolátkový Nd: YAG laser a pro plynový CO a CO₂.

Negativní vliv na absorpci při řezném procesu mají páry kovů a plazma, které mohou odstiňovat laserové záření, tím zabraňují absorpci laserového paprsku povrchem materiálu. Tabulka číslo 3 udává součinitele absorpce při teplotě 20°C pro vybrané materiály v závislosti na vlnových délkách.

Tab. č. 3 Absorpce vybraných materiálů [36]

absorpce A [%]		
materiál	vlnová délka λ [μm]	
	0,9 až 1,1	9 až 11
hliník	26,7	3,1
měď	9,9	1,1
železo	35	6,2
nikl	28	4,4
zinek	51	1,9
chrom	43	7
ocel (1% uhlíku)	36,9	7 až 4

Na výslednou kvalitu řezu mají kromě materiálových vlastností vliv i vlastnosti laserového záření, které jsou popsány v kapitole č. 2.1. Jako poslední a velmi důležité jsou řezné parametry. Tyto parametry jsou většinou nejnepříjemněji ovlivnitelné, mezi hlavní patří:

- režim řezu (cw/pulzní),
- frekvence pulzů,
- duty (střída frekvence),
- výkon laseru,
- řezná rychlost,
- tlak a typ řezného plynu,
- průměr trysky,
- odstup trysky od plechu,
- poloha ohniska,
- parametry ovlivňující ostrý roh,
- parametry vpichu.

Lasery mohou při řezném procesu pracovat v kontinuálním provozu cw (continuous wave) nebo v pulzním provozu. Laserový paprsek v cw provozu nepřetržitě ozařuje místo řezu, a tím umožňuje vyšší řezné rychlosti. Pokud je cílem omezit množství vneseného tepla, je vhodné volit pulzní režim, který snižuje



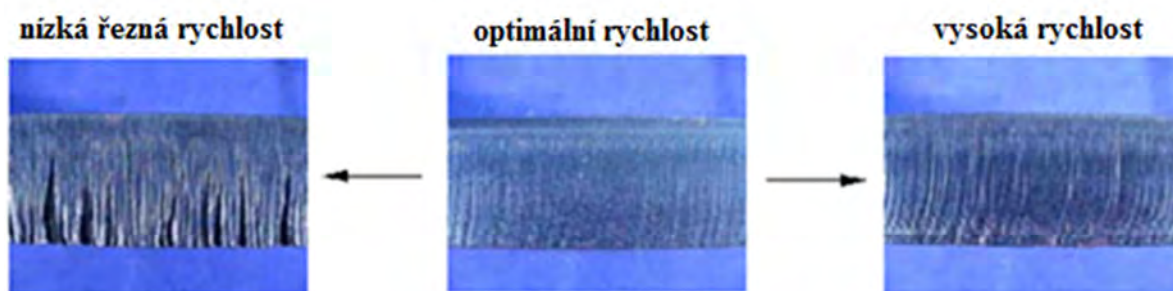
Obr. č. 31 Střída frekvence [1]

množství vneseného tepla, ale zároveň snižuje i řeznou rychlost. U pulzního

režimu je možné volit frekvenci vyslaných pulsů, ta vyjadřuje počet vyslaných pulsů za jednotku času. Pro vyšší řezné rychlosti je volena vyšší frekvence. Parametr označován jako duty - střída frekvence úzce souvisí s frekvencí, je to poměr doby, kdy je pulz vyslán (aktivní doby) a celkové doby pulzu trvání (doba periody). Udává se zlomkem nebo v procentech. Perioda pulzu je pro názornost popsána na obr. č. 31.

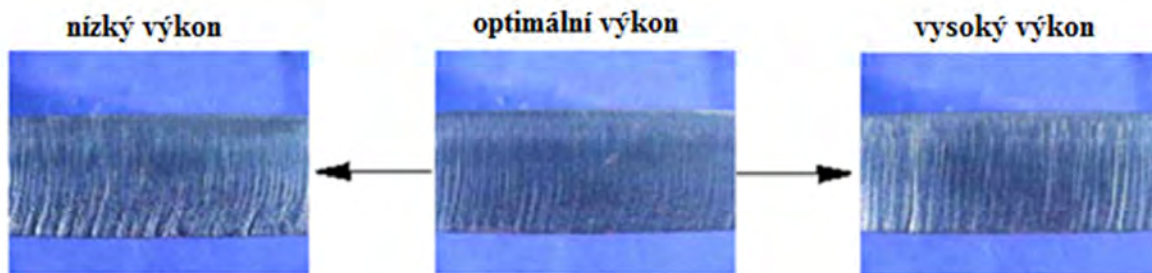
Velmi důležitými parametry jsou řezný výkon laseru a řezná rychlost. Tyto parametry musí být navzájem dobře sladěny. Pokud je zvolena pomalá rychlost k danému výkonu, bude řez spálen a mohou vznikat vypálená místa s obrovským nárůstem drsnosti řezu. Je to velmi častá průmyslová vada, ke které dochází, když je kov přehřátý nebo pokud je laserový paprsek zaostřen asymetricky. V příloze č. 10 je zobrazen vznik tohoto jevu při vysokorychlostním snímání oxidačního řezání. Uvolněná energie při spalování železa je dostatečná k udržení teploty přední části řezu. Vzniklá teplota je vyšší než zápalná teplota železa i bez podpory laserového paprsku. Spalovací proces přechází do sebe udržitelného režimu, zde se projevuje boční efekt spalování a vzniká špatná kvalita řezu s vypálenými místy.

Naopak, pokud bude příliš vysoká řezná rychlost k danému výkonu, hrozí nebezpečí vzniku otřepů, nebo v krajním případě mohou vymizet podmínky pro vznik řezné spáry a může být vytvářena pouze drážka místo řezné spáry. Řezná rychlost klesá se stoupající tloušťkou řezaného materiálu. Rychlost řezání se udává v milimetrech za minutu. Obr. č. 32 zobrazuje vliv řezné rychlosti na řeznou plochu.



Obr. č. 32 Vliv řezné rychlosti [2]

Nastavením výkonu řídíme množství tepla dodávaného do místa řezu. Výkon se udává ve wattch nebo v procentech maximálního výkonu laserového zdroje. Vnesené teplo má vliv na výslednou materiálovou strukturu. Dochází k rychlému ohřevu materiálu a k vysoké rychlosti chladnutí. Vlivem tohoto může docházet k degradaci materiálových vlastností. Obr. č. 33 udává vliv nastavení výkonu laserového paprsku pro silný materiál, obr. č. 34 naopak pro tenký materiál.



Obr. č. 33 Vliv výkonu - silný materiál [2]

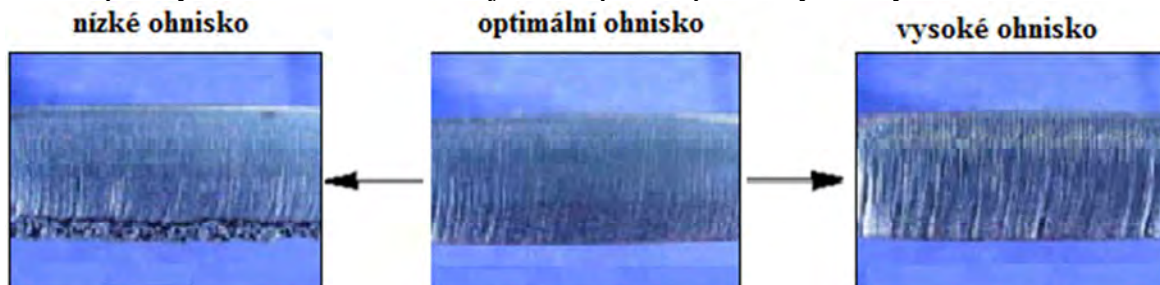


Obr. č. 34 Vliv výkonu - tenký materiál [2]

Jak bylo již zmíněno, tlak plynu se volí dle použitého způsobu řezání. Pokud se jedná o oxidační řezání, je nutné volit nižší tlaky cca 3 až 6 barů. Oxidační řezání je citlivější na vhodnou volbu tlaku plynu. Se zvětšující se tloušťkou řezaného materiálu klesá tlak plynu u uhlíkové oceli. Pro nerezovou ocel při oxidačním řezání se tlak kyslíku zvyšuje se zvětšující řezanou tloušťkou.

U tavného řezání se obecně volí větší tlaky než u oxidačního cca 10 až 20 barů. Se zvětšující se tloušťkou řezaného materiálu se zvyšuje i tlak plynu. Důležitá je čistota řezného plynu, u kyslíku je požadovaná minimálně 99,95%, u dusíku je požadovaná čistota 99,8 %. Pokud je kvalita plynu horší, může docházet k tvorbě oxidů na povrchu řezu, k tvorbě ořepů a hrubnutí řezu.

Ohnisko je umístováno u oxidačního řezání na povrchu nebo těsně pod povrch řezaného materiálu, to platí do tloušťky 6 mm. Pro větší tloušťku řezaného materiálu nad 8 mm se ohnisko umísťuje nad povrch materiálu. U tavného řezání je poloha ohniska na spodním okraji materiálu. Na obr. č. 35 je zobrazena řezná plocha pro tlusté materiály v závislosti na volbě polohy ohniska. Na obr. č. 36 je řezná plocha pro tenký řezaný materiál.



Obr. č. 35 Vliv ohniska – pro tlustý materiál [2]



Obr. č. 36 Vliv ohniska – pro tenký materiál [2]

Významný dopad na kvalitu řezání má průměr trysky. Ovlivňuje množství dodávaného plynu do místa řezu. Vzdálenost trysky nad materiálem má vliv na polohu ohniska a množství plynu, které proudí do řezné spáry. Pro oxidační řezání je odstup trysky od materiálu cca 1,5 mm. U tavného řezání je cca 0,3 mm. Tato vzdálenost nesmí být volena příliš malá, mohlo by dojít k nárazu trysky do nerovností na povrchu řezaného materiálu a k jejímu následnému poškození nebo ke kontaminaci optiky vlivem rozstříku taveniny.

Pro posuzování kvality při tepelném dělení materiálu se používá norma ČSN EN ISO 9013. Jedná se o mezinárodní normu, která platí v Belgii, České republice, Dánsku, Finsku, Francii, Irsku, Islandu, Itálii, Lucembursku, Maďarsku, Maltě, Německu, Nizozemsku, Norsku, Portugalsku, Rakousku, Řecku, Slovensku, Spojeném království, Španělsku, Švédsku a ve Švýcarsku.

Norma se používá pro metody tepelného dělení a klasifikuje kvalitu řezu kyslíkovým plamenem v rozsahu tloušťek materiálů od 3 do 300 mm, řezy vzniklé řezáním plazmou v rozsahu tloušťek materiálu od 1 do 150 mm a pro laserové řezání v rozsahu tloušťek od 0,5 do 40 mm. Norma se dá výjimečně použít pro posouzení kvality řezu pro jiné metody dělení materiálu, například řezání vodním paprskem. V tomto případě se musí vzájemně dohodnout výrobce a zákazník. Mezi hlavní hodnocené parametry, které určují přesnost a kvalitu řezu, patří:

- úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka 'u',
- průměrná výška profilu Rz5.

Jako další parametry se mohou použít:

- skluz 'n',
- natavení horní hrany 'r',
- výskyt okují nebo natavených kapek na dolní straně řezu

Dále norma definuje požadavky na měřidla, kterými jsou jednotlivé parametry kvality řezu měřeny. Jsou rozděleny na hrubá a přesná měřidla. Chyba měřidla nesmí přesáhnout 20 % velikosti charakteristické měřené veličiny. Měření musí být provedeno na kartáčovaných řezech bez oxidů a na místech bez vad. Počet měřících míst závisí na dohodě mezi výrobcem a zákazníkem. Pokud není tento počet blíže specifikován, provádí se pro úchylku kolmosti nebo úchylku úhlů 2 x 3 měření, vždy ve vzdálenosti 20 mm od sebe na metr řezu. Pro řezy o tloušťce menší jak 2 mm musí být předem dohodnut potup měření.

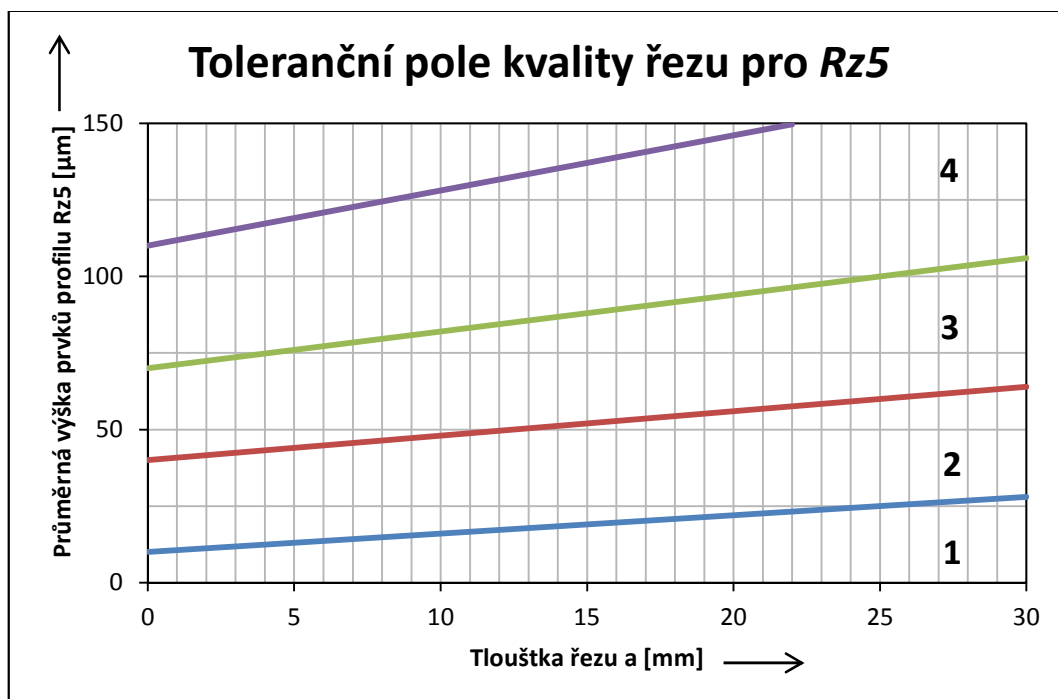
Měření parametru Rz5 se provádí jedno měření na jeden metr délky, musí být provedeno na místech, kde se dá očekávat největší naměřená drsnost. U kyslíkového a plazmového řezání se měření provádí ve 2/3 tloušťky řezu od horní hrany řezu. U laserového řezání se měření provádí v 1/3 tloušťky řezu od horní řezné hrany. Pokud tloušťka řezu nedosahuje 2 mm, měření se provádí v 1/2 tloušťce řezu. U řezů s více řeznými plochami například ve tvaru Y se musí každá plocha posuzovat odděleně.

Norma definuje 4 toleranční pole kvality řezu pro parametr Rz5. Toleranční pole jednotlivých tříd kvality řezu pro průměrnou výšku profilů udává tabulka č. 4, kde 'a' je tloušťka řezu v milimetrech.

Tab. č. 4 Toleranční pole Rz5 [1]

toleranční pole	průměrná výška prvků profilu, Rz5 [μm]
1	$10 + 0,6a$
2	$40 + 0,8a$
3	$70 + 1,2a$
4	$110 + 1,8a$

Dle uvedené tabulky č. 4 je možné zařadit posuzované řezy do jednotlivých tříd kvality řezu. Na obrázku č. 37 je zobrazen graf, v němž jsou vyneseny jednotlivé toleranční pole pro parametr Rz5 do tloušťky řezu 30 mm. V příloze číslo 11 je zobrazen graf s tolerančním polem pro parametr Rz5 do tloušťky řezu 150 mm.



Obr. č. 37 Toleranční pole do 30 mm tloušťky Rz5 [1]

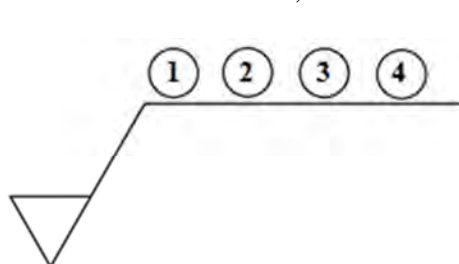
Pro úchylku kolmosti nebo úhlovou úchylku je definováno 5 tolerančních polí přesnosti definované tabulkou č. 5. Grafické znázornění jednotlivých tolerančních polí pro úchylku kolmosti nebo úhlovou úchylku je umístěno v příloze číslo 12.

Tab. č. 5 Toleranční pole pro u [15]

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

Norma dále stanovuje rozměrové úchyly, které platí pouze pro řezy provedené kyslíkovým plamenem a plazmou, přičemž poměr délky a šířky nesmí být větší jak 4:1. Pokud překročí tento poměr, záleží na domluvě mezi výrobcem a zákazníkem. Při řezání laserem závisí dosažené úchyly na geometrii a předběžné úpravě materiálu. Úhlové úchyly nebo úchyly kolmosti jsou posuzovány samostatně.

V technických normách, dokumentacích a výkresech musí být použito značení, které je definované v této normě, viz obr. č 38.



Kde:

- 1 – číslo označující tuto mezinárodní normu,
- 2 – označení pro úchyly kolmosti nebo úhlové úchyly,
- 3 – označení průměrné výšky prvků profilu Rz5,
- 4 – označení toleranční třídy.

Obr. č. 38 Vzor zápisu ČSN EN ISO 9013 [15]

Běžně dosahovaná úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka 'u' se pohybuje při řezání kyslíkovým plamenem na hranici třetího a čtvrtého tolerančního pole. Řezání plazmou se pohybuje v pátém tolerančním poli a řezání laserem se ve většině případů pohybuje na hranici druhého a třetího tolerančního pole. Neplatí to však vždy, záleží na materiálu a na podmínkách při řezání. U hrubozrnných slitin, například slitiny hliníku, hořčíku, mosazi a titanu, jsou dosahované hodnoty až čtyřikrát horší.

Běžně dosahovaná kvalita řezu parametru Rz5 se pohybuje na hranici mezi třetím a čtvrtým tolerančním polem při řezání kyslíkem. U plazmového řezání je kvalita ve čtvrtém tolerančním poli ve spodní části. Řezání laserem do tloušťek přibližně 5 mm je ve druhém a pro větší tloušťky ve třetím tolerančním poli.

Před následujícím měřením drsnosti je nutno ještě upřesnit označení drsnosti Rz5. Rz5 je průměrná výška profilu. Je to průměrná hodnota z pěti po sobě následujících změřených největších výšek profilu Rz. Největší výška profilu Rz patří mezi R parametry vypočítané z profilu drsnosti. Rz je měřena na základní délce l_r .

Hrot profilometr snímá povrch na vyhodnocované délce, která se skládá z pěti základních délek. Pro každou základní délku vyhodnotí drsnost parametr Rz a udělá z těchto hodnot průměrnou hodnotu, kterou zobrazuje na displeji jako parametr Rz. Parametr Rz udávající drsnost je tedy přímo parametr Rz5.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST [3], [4], [8], [39], [50], [54]

Následuje experimentální posouzení obou způsobů laserového řezání. Navržený experiment bude prováděn za účelem získání hodnot drsnosti a tvrdosti řezných ploch, momentového zatížení závitníků při řezání závitů a kvality zalisování matic. Dle získaných hodnot může být vzájemně srovnáno tavné a oxidační laserové řezání pro použití při výrobě konkrétních typů Trager konzol. Je uvažováno

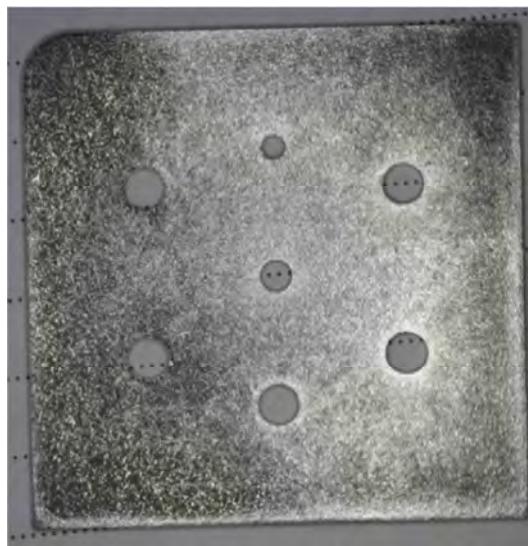


Obr. č. 39 Laserový řezací stroj BySprint [3]

se dvěma způsoby vytvoření závitů do součástí. V první variantě budou do vyřezaných děr řezány závitové závitníkem, ve druhé budou do vyřezaných děr lisovány lisovací matice.

Firma AQUAdem má k dispozici laserový řezací stroj BySprint od firmy Bystronic, viz obr. č. 39. Na tomto stroji jsou vyřezávány všechny typy Trager konzol. K tomuto zařízení je připojen zakladač ByTrans pro automatické založení polotovaru a odebírání odpadního materiálu. Laserový zdroj řezacího stroje je vláknový Yb-YAG laser o maximálním výkonu 3000 W. Na pracovní stůl lze umístit tabuli plechu o maximálních rozměrech 1500 x 3000 mm. Stroj je vhodný k řezání konstrukční oceli do tloušťky 12 mm, nerezové oceli, hliníku, mosazi a mědi do tloušťky 6 mm. Další fotografie tohoto laserového řezacího stroje jsou přiloženy v příloze č. 13. Vláknový laser je vhodný pro zpracování tenkých plechů, u kterých dosahuje vysoké produktivity a kvality laserového řezání.

Pro navržený experiment bylo na popisovaném zařízení vyříznuto 12 vzorků tavným a 12 vzorků oxidačním způsobem. Řezný plán vzorků je zobrazen v příloze č. 14. Vzorky byly řezány ze stejného materiálu, a při shodných řezných parametrech jako jsou použity pro řezání Trager konzol. Na obr. č. 40 je snímek vzorku. Výkres vzorku se nachází v přílohách, viz výkres č. 3. Do vyříznutých otvorů $\phi 4,24$; $\phi 4,30$; $\phi 4,34$ a $\phi 4,36$ mm budou zalisovány lisovací matice. Do otvorů $\phi 2,5$; $\phi 3,3$ a $\phi 4,2$ mm budou řezány závitové závitníky M3; M4 a M5. U každého způsobu laserového řezání jsou používány pro výrobu Trager konzoly dva soubory řezných parametrů. První soubor nazvaný 'CW velké' je používán pro vyřezání kontury a velkých tvarů, druhý soubor nazvaný 'CW malé' je používán pro vyřezávání malých tvarů a otvorů. Soubor parametrů CW malé má sníženou řeznou rychlost a u oxidačního řezání také výkon, aby nedocházelo ke spálení řezu. Řezné parametry pro tavný způsob řezání jsou uvedeny v tabulce č. 6., pro oxidační způsob řezání jsou uvedeny v tabulce č. 7.



Obr. č. 40 Vyříznutý vzorek

Tab. č. 6 Řezné parametry pro tavný způsob [39]

tavné řezání		
	CW velké	CW malé
řezná rychlost [mm/min]	8700	770
řezný výkon [W]	3000	3000
tlak plynu [bar]	17	17
poloha ohniska [mm]	3,3	3,3
odstup trysky [mm]	0,7	0,7
průměr trysky [mm]	2,5	2,5

Tab. č. 7 Řezné parametry pro oxidační způsob [39]

oxidační řezání		
	CW velké	CW malé
řezná rychlost [mm/min]	5700	5000
řezný výkon [W]	1200	1000
tlak plynu [bar]	6	6
poloha ohniska [mm]	0,5	0,5
odstup trysky [mm]	0,7	0,7
průměr trysky [mm]	1	1

Všechny vzorky, jak bylo zmíněno, byly vyřezány ze stejného polotovaru, ze kterého jsou vyráběny konzoly. Polotovar součásti je mořený plech z materiálu S355J2C+N a rozměrech 2,5 x 1250 x 2520 mm. S355J2C+N je konstrukční ocel vhodná zvláště pro řezání laserem. Chemické složení je uzpůsobeno tak, aby nevznikaly otřepy. Tento materiál je určen ke svařování, nejvíce se používá pro strojní součásti a svařované konstrukce s vyšší mezí kluzu, staticky a dynamicky namáhané. Je vhodný ke svařování všemi obvykle používanými způsoby. S rostoucím uhlíkovým ekvivalentem a tloušťkou materiálu se zvyšuje riziko trhlin. Písmeno C v označení udává zaručenou ohybatelnost do tloušťky 30 mm. +N označuje normalizační žíhání polotovarů. Normalizačně žíhaná ocel je i dobře tvářitelná za studena. Materiálový list je v příloze č. 15. V tabulce č. 8 jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti oceli S355J2 a její chemické složení.

Tab. č. 8 Parametry oceli S355J2 [3]

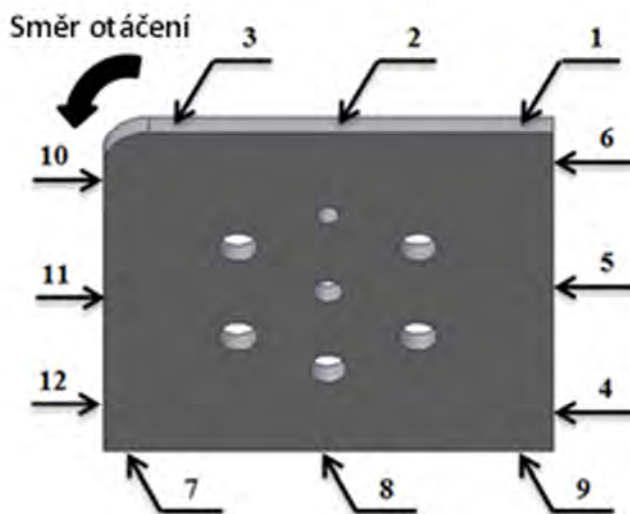
ocel S355J2										
mez pevnosti v tahu Rm [MPa]	mez kluzu ReH [MPa]	tažnost A ₈₀ [%]	chemické složení [%]							
			C	Mn	Si	P	Al	S	Cu	V
579	434	17	0,168	1,430	0,012	0,013	0,034	0,005	0,027	0,001

3.1 Měření drsnosti [1], [11], [15], [24], [44]

První částí experimentu bylo měření drsnosti řezných ploch. Drsnost je významný ukazatel kvality řezu. Vyhodnocení drsnosti proběhlo dle normy ČSN EN ISO 9013, která se používá pro klasifikaci kvality řezu laserovým paprskem, plazmovým paprskem a kyslíkem. Dle normy lze zařadit řezy do tříd kvality řezu a vzájemně tak porovnat laserové řezání tavným a oxidačním způsobem.

Drsnost řezných ploch byla měřena dotykovým digitálním drsnoměrem MarSurf M300, který je spojen s posuvovou jednotkou MarSurf RD 18 přes rozhraní bluetooth. Jednotka obsahuje snímač PHT 6 - 350. Pro zajištění stabilní polohy vzorků byl použit strojní svěrák. V příloze č. 16 je fotografie drsnoměru i s posuvovou jednotkou, a také tabulka se základními údaji o drsnoměru.

Před měřením byla v drsnoměru zvolena jako základní vyhodnocovaná délka $l_r = 0,8 \text{ mm}$ a vyhodnocovaná délka $l_n = 4 \text{ mm}$. Nájezdy a přejezdy si volí měřicí přístroj automaticky. Na vzorcích byla měřena drsnost po obvodu na všech čtyřech obvodových řezných plochách. Na každé ploše byla provedena tři měření dle obr. č. 41. Vzorek byl upnut ve strojním svěráku a měření drsnosti bylo provedeno na místech označených čísly, postupně od čísla 1 až 12. Po provedení třech měření v rámci jedné plochy byl vzorek otočen o 90° a měření se opakovalo. Hrot byl pro měření ustaven přibližně v $1/3$ tloušťky řezné plochy od horní řezné hrany. Při měření byly zapisovány hodnoty parametru drsnosti R_a a R_z5 . Naměřené hodnoty parametru R_z5 pro tavný způsob řezání jsou uvedeny v tabulce č. 9. Ve vedlejší tabulce č. 10 jsou uvedeny naměřené hodnoty parametru R_z5 pro oxidační způsob řezání. Pro každý způsob bylo výše zmíněným postupem změřeno pět náhodně vybraných vzorků.



Obr. č. 41 Schéma měření

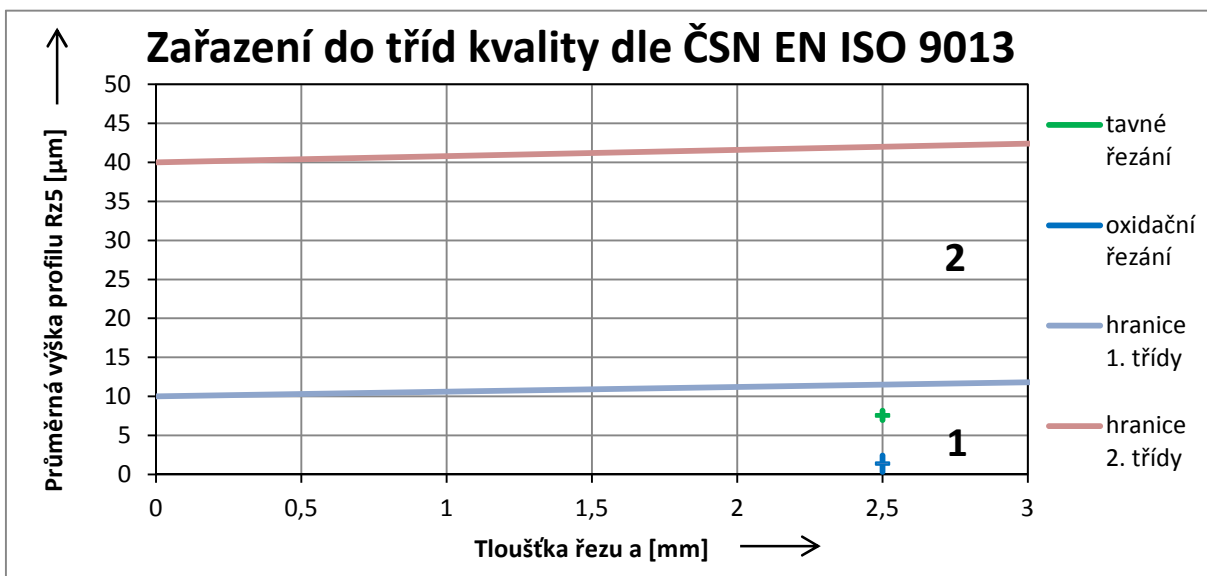
Tab. č. 9 Hodnoty R_z5 pro tavný způsob

číslo vzorku	Tavný způsob řezání R_z5 [μm]			
	strana 1	strana 2	strana 3	strana 4
vzorek 1	5,78	6,345	7,111	7,064
	9,307	7,045	9,141	8,870
	7,210	6,703	7,517	7,166
vzorek 2	6,261	7,604	9,834	8,146
	8,762	10,460	7,172	5,728
	6,150	6,835	8,725	7,476
vzorek 3	6,181	10,060	8,629	8,733
	8,385	6,885	8,574	6,509
	8,894	6,723	8,493	8,582
vzorek 4	7,180	9,420	7,962	6,569
	7,152	6,406	7,647	7,406
	8,257	7,707	5,690	8,639
vzorek 5	8,074	8,860	9,102	7,237
	9,372	6,309	6,646	7,973
	5,337	8,072	7,191	7,931
Střední hodnota [μm]		Směrodatná odchylka δ [μm]		
7,6		1,2		

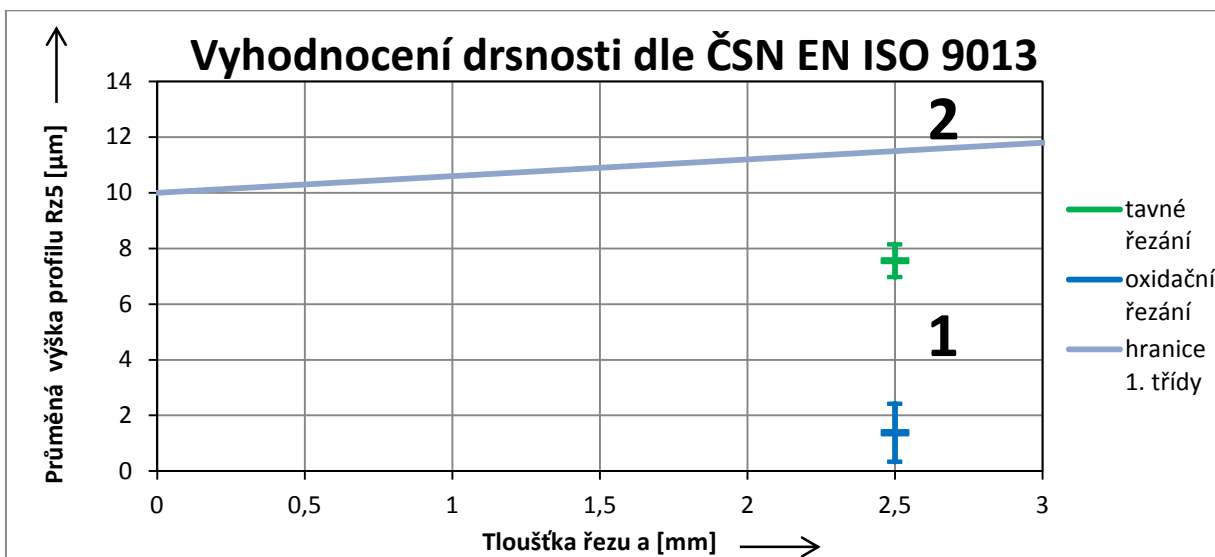
Tab. č. 10 Hodnoty R_z5 pro oxidační způsob

číslo vzorku	Oxidační způsob řezání R_z5 [μm]			
	strana 1	strana 2	strana 3	strana 4
vzorek 1	5,309	1,475	1,138	1,046
	6,538	1,519	1,438	1,088
	6,115	1,342	1,228	0,803
vzorek 2	1,134	1,245	1,697	6,963
	0,846	1,282	1,000	5,747
	1,526	1,552	1,608	5,916
vzorek 3	0,940	1,288	1,405	7,123
	0,950	1,259	1,345	4,801
	2,350	1,135	1,472	6,868
vzorek 4	1,344	1,278	1,473	6,399
	1,437	0,907	1,599	6,881
	1,273	1,049	1,630	5,220
vzorek 5	1,345	0,955	1,173	5,861
	1,158	1,045	1,495	4,743
	1,060	1,276	1,303	5,396
Střední hodnota [μm]		Směrodatná odchylka δ [μm]		
1,4		2,1		

Změřená drsnost parametru Rz5 byla vyhodnocena dle normy ČSN EN ISO 9013. Pro porovnání byly do grafů se stejnou závislostí vyneseny i hodnoty parametru Ra. Z naměřených údajů byla určena střední hodnota a směrodatná odchylka v tabulkovém editoru Microsoft Excel 2010. Pomocí funkce MEDIAN (vyhodnocovaný soubor) byla určena střední hodnota, pomocí funkce SMODCH.P (vyhodnocovaný soubor) byla určena směrodatná odchylka. Do grafů byla vynesena střední hodnota souboru a její spodní a horní odchylka. Střední hodnota je označena tlustou čarou uprostřed a maximální odchylky od ní jsou označeny menšími čarami nad a pod střední hodnotou. Vyhodnocení parametru Rz5 a zařazení oxidačního a tavného způsobu řezání do tříd přesnosti je na obr. č. 42. Oxidační řezání je v grafu zobrazeno modrou barvou a tavný způsob řezání zelenou barvou. Na obr. č. 43 je zobrazena stejná závislost ve větším měřítku.



Obr. č. 42 Zařazení do tříd kvalit řezu dle ČSN EN ISO 9013 [15]

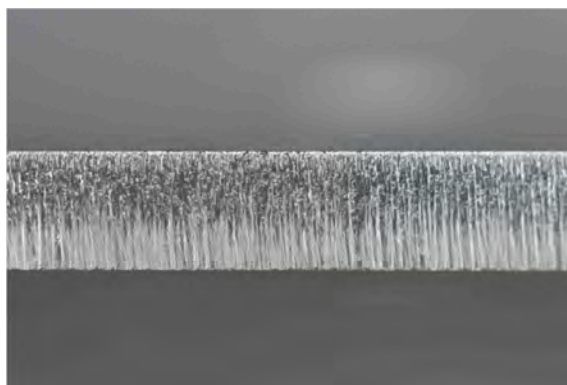


Obr. č. 43 Zpracování hodnot Rz5 dle ČSN EN ISO 9013[15]

Řezné plochy oxidačního způsobu jsou zařazeny do první třídy kvality řezu, stejně je tomu i u tavného způsobu. Oxidační způsob řezání je položen níže v první třídě přesnosti, což poukazuje na to, že změřené hodnoty parametru Rz5 byly nižší, a tedy i jeho drsnost byla menší. Pokud však porovnáme makrosnímky řezných ploch, je vidět, že v místě měření u oxidačního způsobu řezání je povrch velmi hladký, blíže k okrajům, kde ve většině případů měření neprobíhalo, je hrubě rýhován, viz obr. č. 44. Naměřené hodnoty u oxidačního způsobu řezání nejsou úplně vypovídající pro celou řeznou plochu. Dle normy ČSN EN ISO 9013 jsou však hodnoty objektivní, protože měření bylo provedeno v oblasti definované normou. U tavného způsobu řezání se nevyskytují velké změny v drsnosti povrchu v rozsahu tloušťky, viz obr. č. 45. Bylo pořízeno více makrofotografií řezných ploch, viz příloha č. 17.

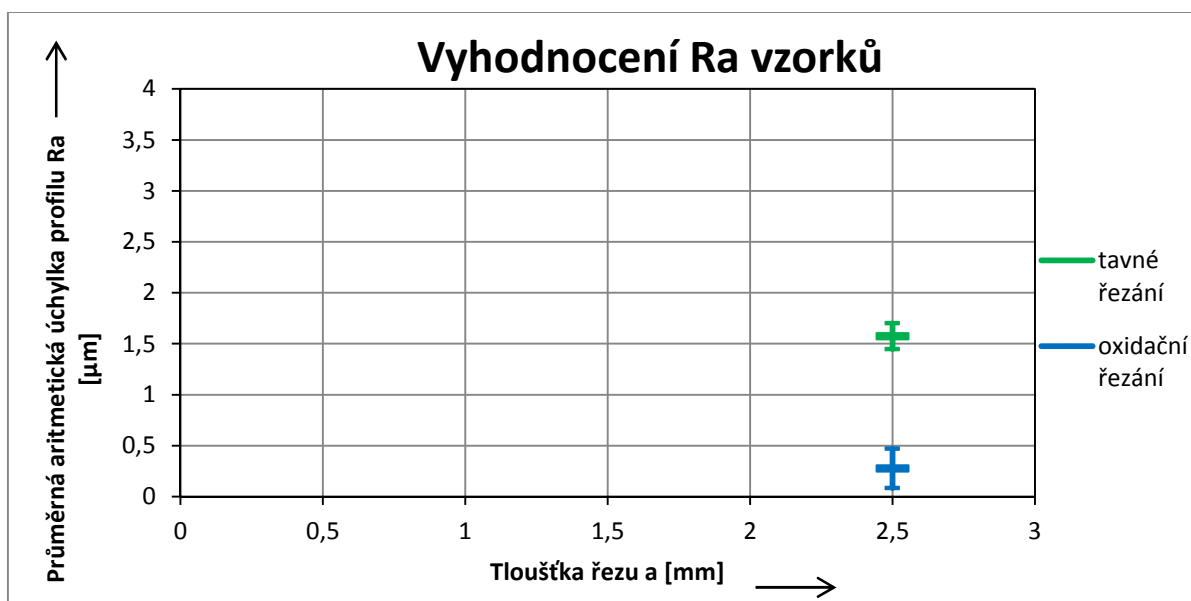


Obr. č. 44 Řezná plocha – oxidační způsob



Obr. č. 45 Řezná plocha – tavný způsob

Naměřené hodnoty parametru Ra jsou uvedeny v tabulce č. 11. pro tavný způsob řezání. Hodnoty drsnosti parametru Ra pro oxidační způsob řezání jsou v tabulce č. 12. Na obr. č. 46 jsou tyto hodnoty vyneseny ve stejné závislosti jako u parametru Rz5, pro možnost srovnání. Parametr Ra nemá v normě definovány třídy přesnosti. Norma třídí kvalitu řezu pouze dle parametru drsnosti Rz5, proto nebylo podle parametru Ra provedeno zařazení do tříd kvality. Získaná závislost ukazuje stejné výsledky jako parametr Rz5. Hodnoty drsnosti jsou menší u oxidačního řezání, střední hodnota je 0,3 μm . U tavného způsobu řezání je střední hodnota Ra 1,6 μm .



Obr. č. 46 Zpracování hodnot Ra

Tab. č. 11 Hodnoty Ra pro tavný způsob řezání

číslo vzorku	Tavný způsob řezání Ra [μm]			
	strana 1	strana 2	strana 3	strana 4
vzorek 1	1,195	2,463	1,415	1,376
	2,014	1,355	1,787	1,722
	1,309	1,376	1,910	1,455
vzorek 2	1,352	1,537	1,849	1,770
	1,620	1,559	1,506	1,280
	1,428	1,448	1,502	1,913
vzorek 3	1,196	1,965	1,844	1,986
	1,621	1,255	1,625	1,393
	1,769	1,354	1,669	1,820
vzorek 4	1,427	1,846	1,630	1,516
	1,338	1,381	1,601	1,210
	1,395	1,587	1,149	1,639
vzorek 5	1,631	1,832	1,653	1,642
	1,885	1,305	1,365	1,704
	1,166	1,687	1,622	1,550
Střední hodnota [μm]		Směrodatná odchylka δ [μm]		
1,6		0,3		

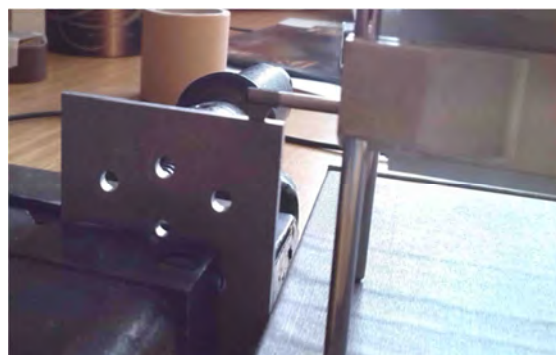
Tab. č. 12 Hodnoty Ra pro oxidační způsob řezání

číslo vzorku	Oxidační způsob řezání Ra [μm]			
	strana 1	strana 2	strana 3	strana 4
vzorek 1	1,038	0,315	0,245	0,197
	1,344	0,304	0,308	0,222
	1,076	0,266	0,241	0,160
vzorek 2	0,185	0,274	0,304	1,420
	0,170	0,263	0,211	1,056
	0,269	0,356	0,322	0,916
vzorek 3	0,191	0,241	0,292	1,334
	0,198	0,258	0,294	0,828
	0,405	0,224	0,252	1,332
vzorek 4	0,245	0,269	0,299	1,382
	0,284	0,190	0,328	1,058
	0,261	0,206	0,338	1,011
vzorek 5	0,281	0,206	0,270	1,136
	0,245	0,191	0,283	0,764
	0,201	0,222	0,269	0,940
Střední hodnota [μm]		Směrodatná odchylka δ [μm]		
0,3		0,4		

Na obr. č. 47 je vidět ustavení vzorku před měřením drsnosti, na obr. č. 48 je pohled na vzorek a snímací hrot posuvové jednotky při měření



Obr. č. 47 Ustavení vzorku



Obr. č. 48 Měření drsnosti

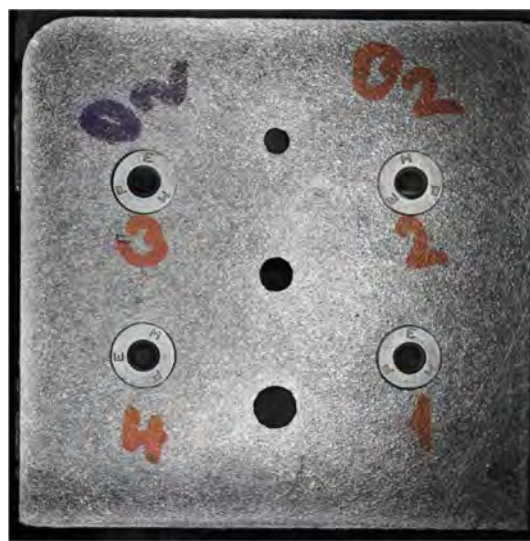
3.2 Měření tvrdosti [23], [50], [56], [64]

V dalším kroku byly do vyříznutých otvorů o průměrech $\phi 4,24$; $\phi 4,30$; $\phi 4,34$; $\phi 4,36$ mm zalisovány lisovací matice M3. Matice byly zalisovány do obou vzorků, do vzorku řezaného tavným i oxidačním způsobem. Vzorek se zalisovanými maticemi řezaný tavným způsobem bude dále označován jako 'zalisovaný vzorek N₂'. Vzorek se zalisovanými maticemi řezaný oxidačním způsobem bude dále označován jako 'zalisovaný vzorek O₂'.

Jedná se o lisovací matice typů S, část katalogu s těmito maticemi je přiložen v příloze č. 18. V katalogu jsou uvedeny rozměry výchozích otvorů, které jsou potřebné pro jejich zalisování. Pro matice M3 je předepsán otvor $4,25 + 0,08$ mm. Do všech otvorů se matice daly zalisovat snadno bez obtíží. Na obr. č. 49 je zalisovaný vzorek N₂. Na obr. č. 50 je zalisovaný vzorek O₂.



Obr. č. 49 Zalisovaný vzorek N₂



Obr. č. 50 Zalisovaný vzorek O₂

Zalisované vzorky byly následně rozřezány a byly z nich vyrobeny metalografické vzorky, na kterých byla měřena tvrdost postupně od řezné hrany. Dělení vzorů bylo provedeno dle nákresu v příloze č. 19 na rozbrušovací laboratorní pile Mikron 110, viz obr. č 51. Vedle v tabulce č. 13 jsou uvedeny její parametry. Při dělení zalisovaného vzorku O₂ byl dělicí řez veden příliš na střed lisovací matice, při dokončení řezu by hrozilo samovolné vypadnutí lisovací matice ze vzorku. Kvůli tomuto nepodařenému řezu musely být řezy rozmístěny jinak než u zalisovaného vzorku N₂. V příloze č. 20 jsou fotografie pořízené během dělení vzorků pro přípravu metalografických vzorků.



Obr. č. 51 Pila Mikron 110 [23]

Tab. č. 13 Parametry pily Mikron 110 [23]

Základní technické parametry	
rozměry	šířka 550 mm, délka 630 mm, výška 500 mm
hmotnost	42 kg bez chladicí kapaliny
průměr kotouče	150 mm, max. 160 mm
Otáčky	500 – 4000 ot/min
napájení	32/24V, 435 W
hlučnost	45 dB

Nařezané vzorky byly zalité do černé plastové hmoty s obchodním označením Multifast na automatickém metalografickém lisu CitoPress – 1 od firmy Struers, viz obr. č. 52. Fotografie při zalisování vzorků jsou v příloze č. 21. Zalité vzorky byly vybroušeny na metalografickém zařízení Struers Tegramin – 20, viz obr. č. 53. Další snímek zařízení pro výbrus vzorků se nachází v příloze č. 22.

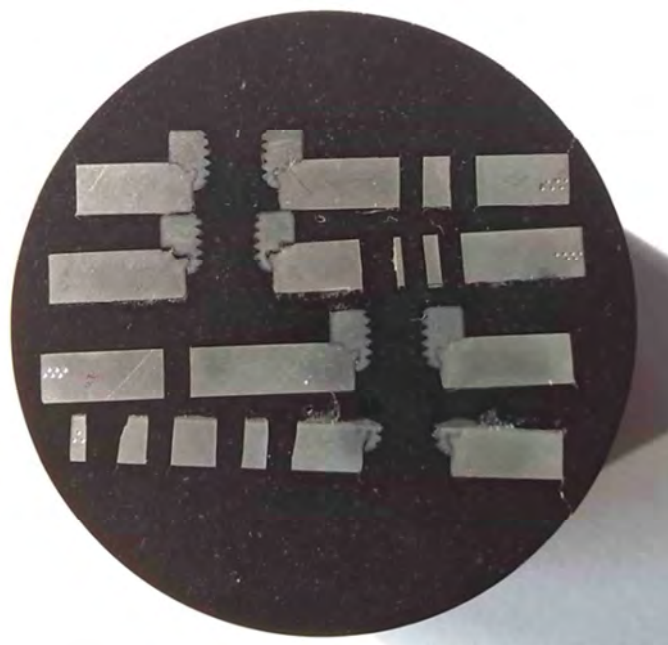


Obr. č. 52 Metalografický lis [56]



Obr. č. 53 Zařízení pro výbrus vzorků [56]

Byly vytvořeny celkem dva metalografické vzorky. V prvním metalografickém vzorku jsou zalité všechny čtyři části zalisovaného vzorku N_2 , na kterých bylo provedeno měření tvrdosti. Dále bude tento metalografický vzorek označován pod názvem 'metalografický vzorek N_2 '. Ve druhém, označovaném pod názvem 'metalografický vzorek O_2 ', jsou všechny části vzorku řezané oxidačním způsobem. Metalografický vzorek N_2 je na obr. č. 54. Řezná hrana, od které bylo provedeno měření tvrdosti, je vždy na vzdálenějším kraji od zalisované matice. Na těchto hranách jsou vidět vtisky od tvrdoměru. V jednotlivých vzorcích byly vybroušeny drážky přes celou tloušťku plechu. Počet drážek na jednotlivých vzorcích označují čísla, kterými byly označeny otvory se zalisovanými maticemi na zalisovaném vzorku N_2 , viz obr. č. 49. Podle tohoto obrázku a dle počtu drážek lze jednoznačně určit z výkresu vzorku, do jak velkého otvoru byla matice lisovaná. Na metalografickém vzorku N_2 , viz obr. č. 54, je nejvýše umístěn vzorek s otvorem č. 2, pod ním je vzorek s otvorem č. 3, následuje vzorek s otvorem č. 1 a úplně dole je vzorek s otvorem č. 4. Tento poslední vzorek není ideálně zalisován v lisovací hmotě. Při lisování došlo k jeho naklonění a na výbrusu není vidět celá výška matice, nicméně tvrdost na něm byla změřena bez problému. Pro přehled je sestavena tabulka, kde jsou číslům vzorku přiřazeny průměry výchozích otvorů pro lisování matic, viz tabulka č. 14, která je umístěna na následující straně. Je sestavena pro vzorek řezaný tavným způsobem. V příloze č. 23 je metalografický vzorek N_2 zvětšen s uvedením popisu čísel zalitých vzorků a s označením řezných hran, od kterých se provádělo měření tvrdosti.



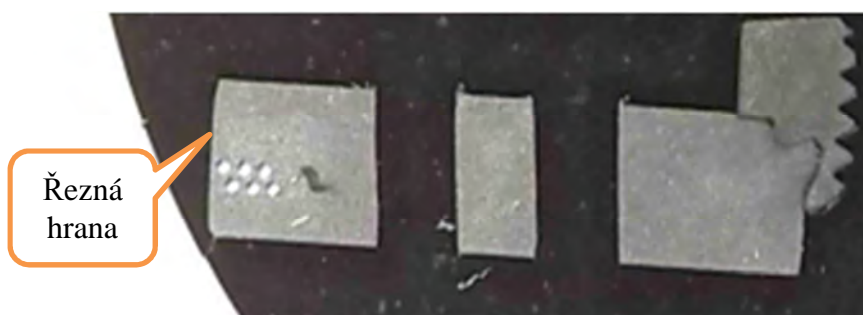
Obr. č. 54 Metalografický vzorek N_2

Tab. č. 14 Průměr otvorů pro metalografický vzorek N₂

číslo otvoru = číslo metalografického vzorku	průměr otvoru [mm]
1	4,36
2	4,34
3	4,30
4	4,24

Při pohledu na metalografický vzorek lze říci, že nejlépe je nalisovaná matice ve vzorku s otvorem č. 2, jemuž odpovídá výchozí průměr otvoru pro zalisování 4,34 mm. Předepsaná hodnota výchozího otvoru pro lisovací matice je $4,25 + 0,08 = 4,33$ mm. Nejhůře je zalisována matice ve vzorku číslo 3. Průměr výchozího otvoru pro lisování matice ve vzorku s otvorem č. 3 je 4,30 mm.

Samotné měření tvrdosti probíhalo postupně od kraje řezné hrany směrem dovnitř materiálu ve vzdálenosti 0,2; 0,4; 0,7; 0,9; 1,2 a 1,4 mm. Tvrdost byla měřena ve dvou řadách, aby mohly být vtisky umístěny s co menšími rozestupy od řezné hrany, viz obr. č. 55.



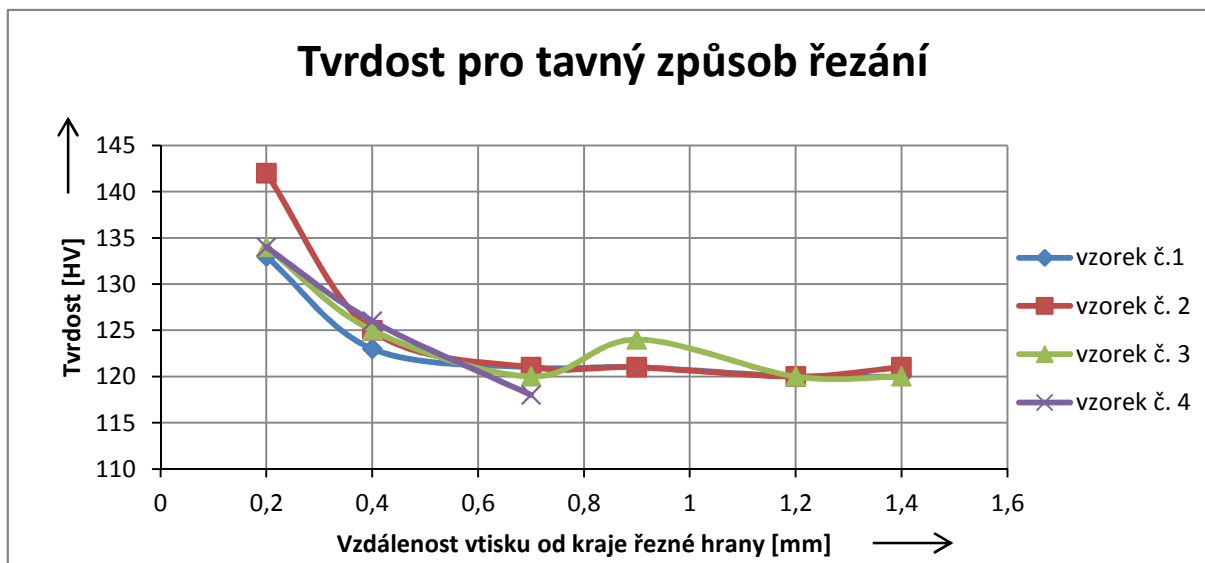
Obr. č. 55 Dvě řady vtisků při měření tvrdosti od řezné hrany

V jedné řadě jsou vtisky od sebe vzdálené 0,5 mm. Tvrdost byla změřena dle Vickerse pomocí tvrdoměru Zwick 3212 s CCD kamerou se softwarem Zwick/ Roell Test Expert a elektronickým přídatným zařízením pro měření doby zatížení. Tvrdoměr s dalším příslušenstvím je zobrazen v příloze č. 24. Použité zatížení bylo 5 kg, doba zatěžování se pohybovala mezi 12 - 15 s. Naměřené hodnoty tvrdosti na metalografickém vzorku N₂ jsou uvedeny v tabulce č. 15.

Tab. č. 15 Tvrdost pro metalografický vzorek N₂

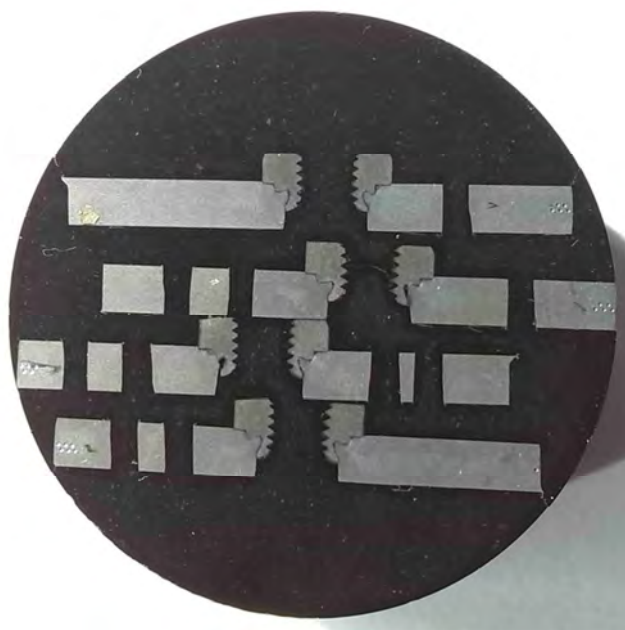
Tvrdost pro tavný způsob řezání					
vzdálenost vtisku od kraje řezné hrany [mm]	tvrdost [HV]				střední hodnota tvrdosti [HV]
	vzorek č. 1	vzorek č. 2	vzorek č. 3	vzorek č. 4	
0,2	133,0	142,0	134,0	134,0	134,0
0,4	123,0	125,0	125,0	126,0	125,0
0,7	121,0	121,0	120,0	118,0	120,5
0,9	121,0	121,0	124,0	-	121,0
1,2	120,0	120,0	120,0	-	120,0
1,4	120,0	121,0	120,0	-	120,0

Na obr. č. 56 je graf s vynesnými hodnotami tvrdosti jednotlivých vzorků v závislosti na vzdálenosti od řezné hrany.



Obr. č. 56 Tvrđost pro tavný způsob řezání

Metalografický vzorek O₂ je na obr. č. 57. Čísła zalitých vzorků, a tedy i číselné označení výchozích otvorů jsou opět udány počtem vybroušených drážek přes celou tloušťku odebraného vzorku. Vzhledem k odlišnému postupu při odbírání vzorků jsou vzorky a řezné hrany v jiných polohách než u metalografického vzorku N₂. Číselný popis jednotlivých vzorků a označení polohy řezných hran je v příloze č. 25. Na řezných hranách jsou vidět vtisky od tvrdoměru.



Obr. č. 57 Metalografický vzorek O₂

Při pohledu na metalografický vzorek O₂, viz obr. č. 57, je úplně nahoře vzorek s otvorem č. 1, níže pod ním je vzorek s otvorem č. 3. Oba tyto vzorky mají řeznou hranu na pravé straně. Pod vzorkem č. 3 je vzorek s otvorem č. 4 a úplně dole je vzorek s otvorem č. 2.

Vzorky č. 4 a 2 mají řeznou hranu na levé straně. V tabulce č. 16 jsou uvedeny čísla vzorků a jim odpovídající výchozí otvory pro zalisování.

Tab. č. 16 Průměr otvorů pro metalografický vzorek O₂

číslo otvoru = číslo metalografického vzorku	průměr otvoru [mm]
1	4,36
2	4,34
3	4,24
4	4,30

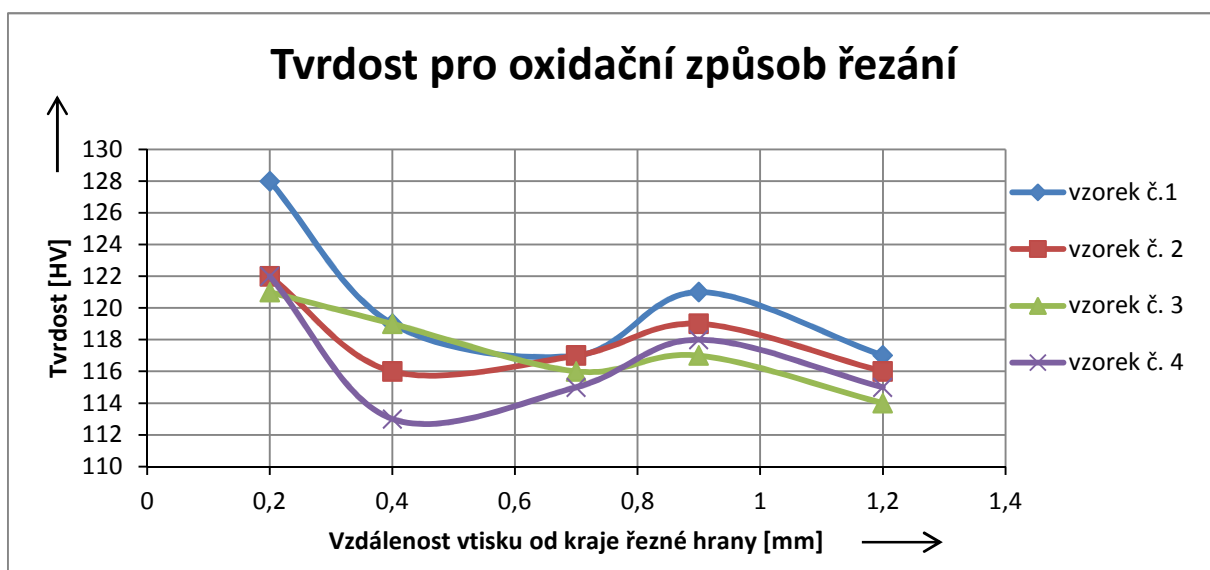
Při pohledu na metalografický vzorek O₂ lze říci, že nejlépe je nalisovaná matice ve vzorku č. 2, nejhůře ve vzorku č. 4. Vzorku 2 odpovídá výchozí průměr otvoru 4,34 mm. Tento otvor je větší o 0,01 mm než předepsaná tolerance pro výchozí lisovací otvory 4,25 + 0,08 mm. Překvapivě nejhůře je zalisovaná matice na vzorku č. 4, jehož výchozí otvor pro zalisování byl opět 4,30 mm. Tato hodnota se pohybuje v předepsaném rozmezí otvorů pro zalisování.

U obou zalisovaných vzorků byly nejlépe zalisovány matice v otvorech o průměrech 4,34 mm bez ohledu na způsob laserového řezání. Nejhorší kvalita zalisování byla u otvorů 4,30 mm. Je to překvapivé, neboť průměr 4,30 mm leží v předepsaném rozsahu 4,25 + 0,08 mm. Z tohoto pozorování však nelze vyvodit definitivní závěry. Pozorování by muselo probíhat na větším počtu vzorků a muselo by zahrnout zkoumání samotného procesu lisování matic. Nicméně lze doporučit, aby se otvory pro zalisování matic pohybovaly těsně na maximální hranici předepsané hodnoty tedy 4,33 mm nebo o 0,01 – 0,03 mm větší, jako v případě otvoru 4,34 mm nebo 4,36 mm, neboť kvalita zalisování ve výchozím otvoru o průměru 4,36 mm byla také dobrá.

Samotné měření tvrdosti metalografického vzorku O₂ probíhalo stejně jako u metalografického vzorku N₂ od kraje řezné hrany směrem dovnitř materiálu ve vzdálenosti 0,2; 0,4; 0,7; 0,9; 1,2 mm. Naměřené hodnoty tvrdosti na metalografickém vzorku O₂ jsou uvedeny v tabulce č. 17. Dále jsou vyneseny v grafu hodnoty tvrdosti jednotlivých vzorků v závislosti na vzdálenosti od řezné hrany, viz obr. č. 58.

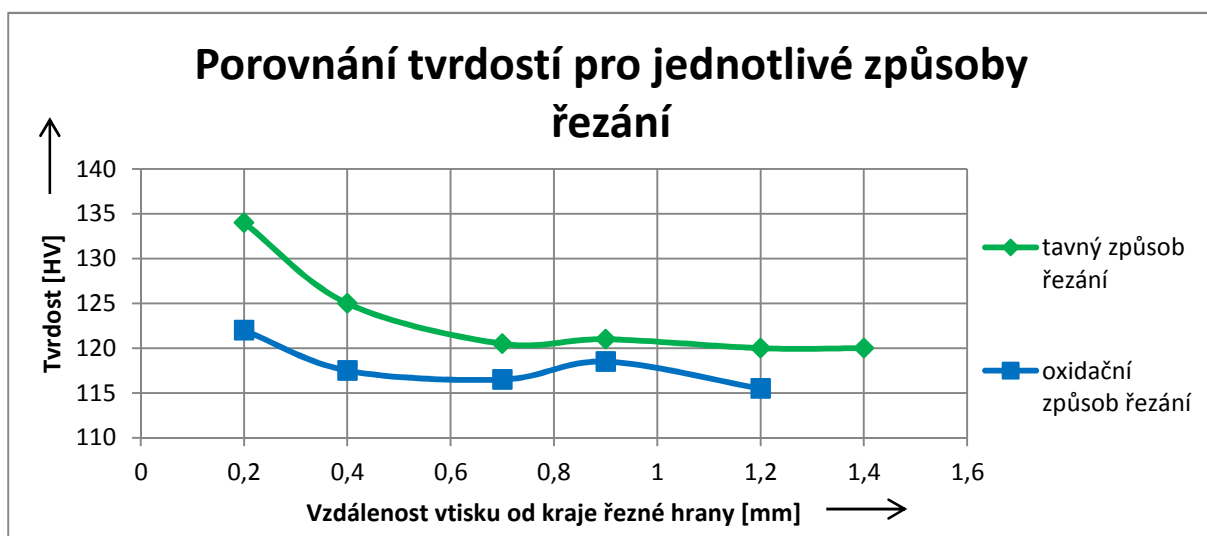
Tab. č. 17 Tvrdost pro metalografický vzorek O₂

Tvrdost pro oxidační způsob řezání					
vzdálenost vtisku od kraje řezné hrany [mm]	tvrdost [HV]				střední hodnota tvrdosti [HV]
	vzorek č. 1	vzorek č. 2	vzorek č. 3	vzorek č. 4	
0,2	128,0	122,0	121,0	122,0	122,0
0,4	119,0	116,0	119,0	113,0	117,5
0,7	117,0	117,0	116,0	115,0	116,5
0,9	121,0	119,0	117,0	118,0	118,5
1,2	117,0	116,0	114,0	115,0	115,5



Obr. č. 58 Tvrdost pro oxidační způsob řezání

V následujícím grafu jsou vyneseny střední hodnoty tvrdosti pro metalografické vzorky N₂ (řezané tavně) a pro metalografické vzorky O₂ (řezané oxidačně) v závislosti na vzdálenosti od řezné hrany, viz obr. č. 59.



Obr. č. 59 Průběh tvrdostí pro tavný a oxidační způsob řezání

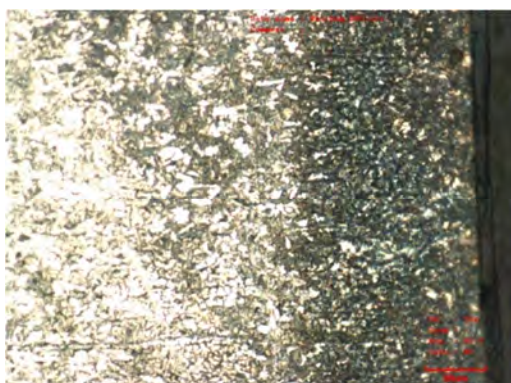
U obou způsobů laserového řezání mají střední hodnoty tvrdosti stejné průběhy v závislosti na vzdálenosti od řezné hrany. U tavného způsobu řezání jsou tvrdosti řezné hrany vyšší než u oxidačního způsobu řezání, průběhy jsou si však velmi podobné. Největší tvrdost je na řezné hraně, se zvětšující vzdáleností se tvrdost postupně zmenšuje. Lokální nárůst tvrdosti je pozorován ve vzdálenosti 0,9 mm u obou způsobů řezání. Dochází k dalšímu poklesu a následně k ustálení, poté je již tvrdost konstantní. Rozdíl mezi tvrdostí u tavného a oxidačního způsobu není nijak velký, maximální odchylka průměrných hodnot činí 12 HV, což není významné zvýšení tvrdosti. Základní materiál vykazuje tvrdost 110 HV. Vyšší tvrdost u tavného způsobu řezání je především způsobena vyšší rychlostí ochlazování, přičemž vzniká jemnější struktura zrn materiálu, která koresponduje se zvýšenou tvrdostí. Rychlejší ochlazování řezu u tavného způsobu řezání je dána vysokou rychlostí a velkým množstvím řezného plynu, který prostupuje řeznou spárou.



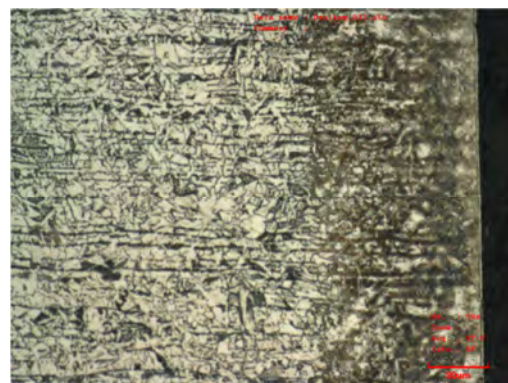
Obr. č. 60 Mikroskop Olympus Lext OLS 3100

Byly pořízeny makrosnímky a mikrosnímky metalografických vzorků. V příloze č. 26 jsou makrosnímky pro metalografický vzorek N₂, v příloze č. 27 jsou uvedeny pro metalografický vzorek O₂. Zde je možné vidět ještě jednou detailně kvalitu zalisování matic. Byly pořízeny mikrosnímky řezných hran při různých zvětšeních, a také snímky zalisování matice. V příloze č. 28 jsou mikrosnímky řezné hrany řezané tavným způsobem a v příloze č. 29 jsou snímky řezné hrany řezané oxidačním způsobem. Mikrosnímky byly pořízeny na laserovém mikroskopu Olympus Lext OLS 3100, který je umístěn na Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., viz obr. 60.

Mikrosnímek řezné hrany při řezání tavným způsobem představuje obr. č. 61 (zvětšení 50 x), vpravo od něj je mikrosnímek řezné hrany oxidačního řezání, viz obr. 62 (zvětšení 50 x). Řezná hrana vytvořená při řezání dusíkem je tmavší a má jemnozrnější strukturu.



Obr. č. 61 Řezná hrana N₂



Obr. č. 62 Řezná hrana O₂

3.3 Měření řezných momentů [12], [43], [50], [60]

V poslední části experimentu bylo provedeno měření řezných sil při řezání závitů. Účelem bylo posouzení vlivu vlastností řezných hran u jednotlivých způsobů laserového řezání na závitování.

Dle katalogu od firmy Narex Žďánice byly vybrány vhodné strojní závitníky pro řezání závitů M3, M4 a M5 na Trager konzolách. Strana z katalogu s vybraným typem závitníku je v příloze č. 30. Jedná se o závitníky s označením B. 1540 s přesností 6H, viz obr. č. 63. Tyto závitníky jsou určeny pro řezání závitů v průchozích otvorech v automatové a konstrukční oceli s pevností do 800 N/mm². Závitníky jsou vyrobeny z rychlořezné kobaltové oceli HSSE. Řezný kužel je dlouhý 3,5 – 6 mm. Povrch závitníku je upraven oxidací, tato povrchová úprava zlepšuje kluzné vlastnosti povrchu, v katalogu je značena jako 'OX'. Provedení závitníku odpovídá normě DIN 371.

Doporučená řezná rychlost při řezání závitů je 6 – 10 m/min. Jako řezná kapalina může být použita emulze nebo řezný olej.

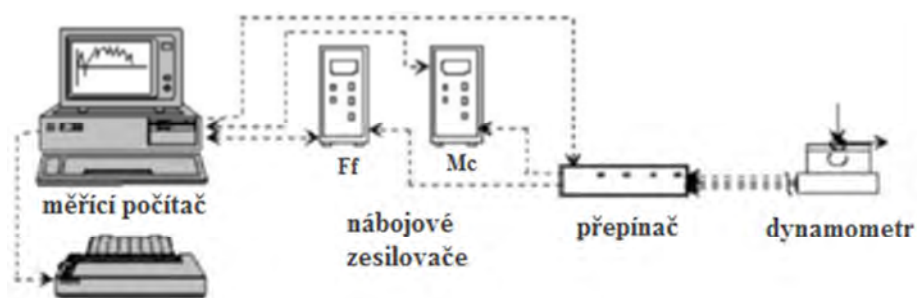
Pro měření silového zatížení závitníků řezným momentem byl



Obr. č. 63 Závitník 1540 [43]



Obr. č. 64 Kistler 9272 [12]



Obr. č. 65 Schéma měřicí aparatury [60]

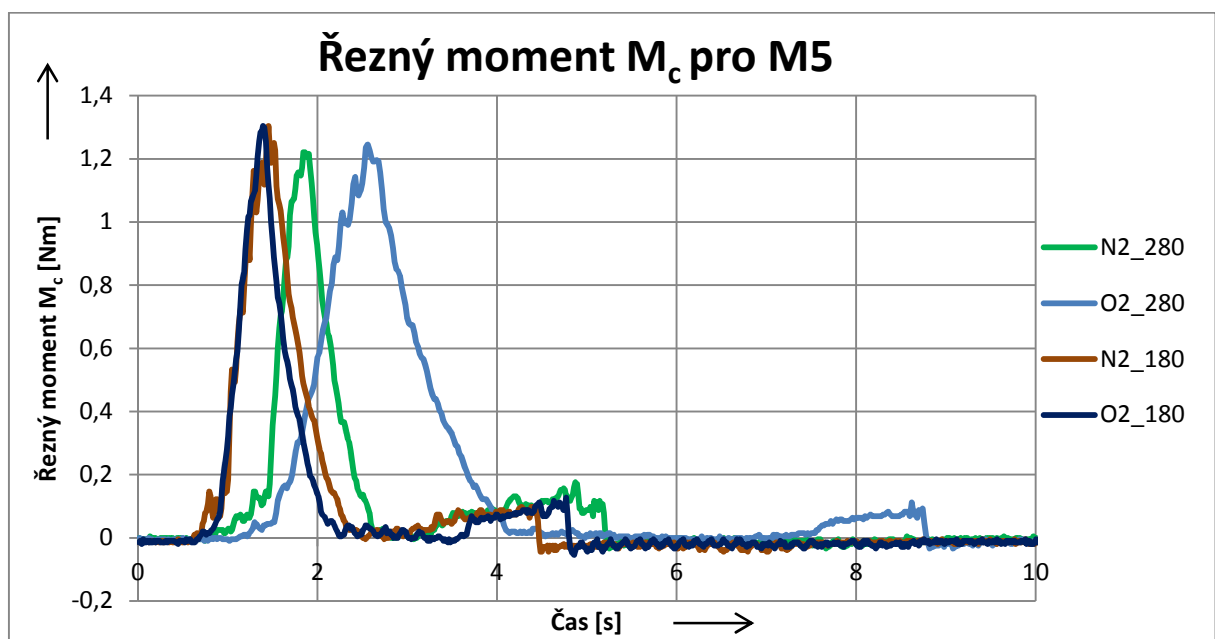
použit čtyřsložkový křemíkový piezoelektrický dynamometr Kistler s označením 9272, viz obr. č. 64. Celá aparatura pro měření řezných momentů se skládala ze zmíněného dynamometru, z nábojových zesilovačů Kistler 5011, přepínače a stolního počítače, který snímané údaje zaznamenával. Schéma měřicí aparatury je na obr. č. 65.

Dynamometr byl upnut pomocí upínek v T-drážkách na stole stolní vrtačky Tos V20. Pro připevnění vzorků byl použit strojní svěrák, který byl přišroubován na dynamometru. Závitníky byly upnuty ve vrtačce do kleštiny. Při měření byl nejdříve vyříznutý vzorek ustaven do strojního svěráku na střed dynamometru, dále bylo provedeno sražení hrany pro lepší zařiznutí závitníku. Poté byl výchozí otvor pro závit vystředěn do osy vřetene stroje pomocí středícího hrotu, poposunutím celého dynamometru se svěrákem po stole vrtačky. Následovalo měření. Při řezání závitů byl použit řezný olej. Výchozí otvory na vzorcích pro závity M5, M4 a M3 byly $\phi 4,2$; $\phi 3,3$ a $\phi 2,5$ mm, viz výkres č. 3. Z důvodu manuální obsluhy vrtačky byla použita nižší řezná rychlost, než je u závitníku doporučována výrobcem. Tyto podmínky odpovídají i skutečné výrobě závitů na Trager konzolách. Měření vzorků probíhalo ve dvou sériích. Při první sérii měření byl nastavený počet otáček 180 min^{-1} , pro druhou sérii měření bylo použito 280 min^{-1} . V tabulce č. 18 jsou uvedeny odpovídající řezné rychlosti v metrech za minutu pro jednotlivé závitníky při daných otáčkách.

Tab. č. 18 Řezné rychlosti

	závit	otáčky [min^{-1}]	
		180	280
řezná rychlost [mm/min]	M3	1,70	2,64
	M4	2,26	3,52
	M5	2,83	4,40

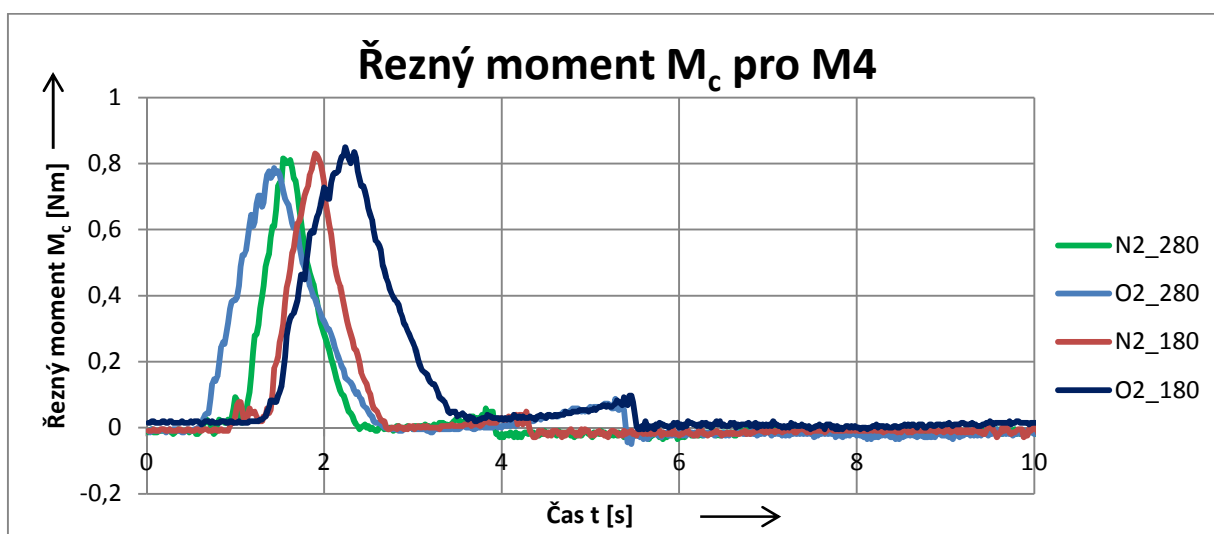
Nejdříve byly měřeny momenty při řezání závitů M5 při otáčkách 180 min^{-1} na vzorcích řezaných tavně i oxidačně. Následně byly otáčky zvýšeny na 280 min^{-1} . Stejným způsobem byl měřen řezný moment u závitů M4 a M3. Fotografie pořízené během měření se nachází v příloze č. 31. Naměřené hodnoty byly importovány a zpracovány v tabulkovém editoru Microsoft Excel 2010. Byly vytvořeny grafy vždy pro jeden typ závitů. Vyhodnocení řezných momentů pro závit M5 je zobrazeno na obr. č. 66.



Obr. č. 66 Graf s vyhodnocením řezných momentů pro M5

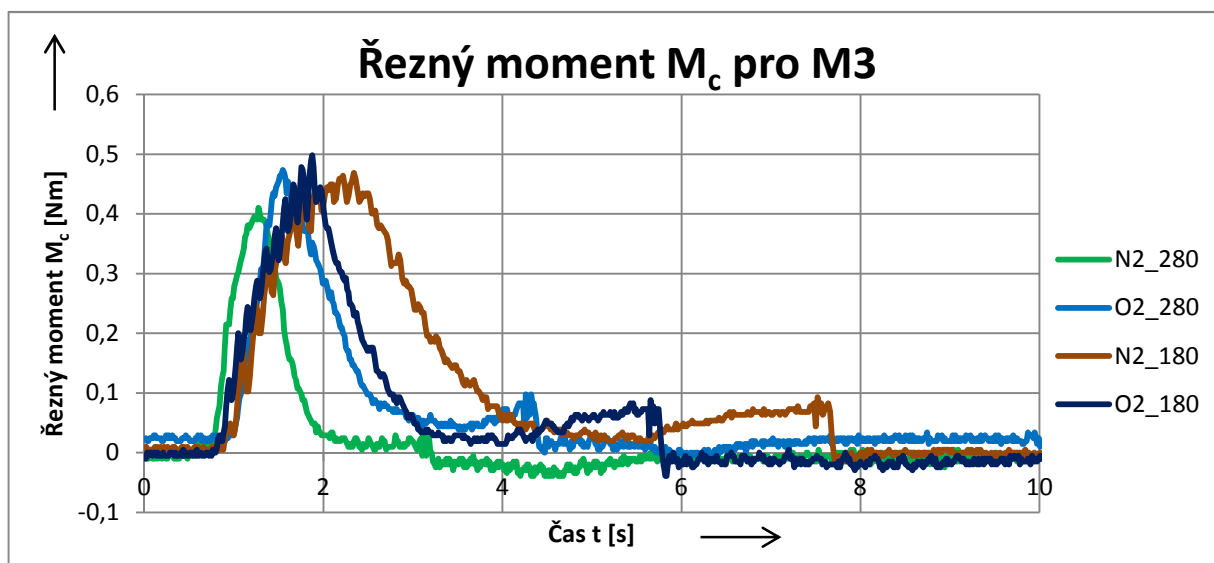
V popisu u grafu je uvedeno označení jednotlivých vzorků. O2 značí vzorek řezaný oxidačním řezáním, N2 označí vzorek řezaný tavným řezáním. Číslo za podtržítkem znamená počet otáček za minutu, které byly použité pro řezání závitů. Nejmenší řezný moment byl u vzorku řezaného tavně = 1,216 Nm při použitých otáčkách 280 min^{-1} . Jednalo se tedy o vzorek s označením N2_280. Druhý nejmenší moment byl naměřen u vzorku O2_280. U vzorků N2_180 a O2_180 byly naměřeny stejné hodnoty řezných momentu 1,304Nm, a zároveň tyto hodnoty byly největší při řezání závitu M5.

Na obr. č. 67 je uveden graf s vyhodnocením měření pro závity M4. Nejmenší hodnoty řezného momentu byly naměřeny u vzorku řezaného oxidačním způsobem O2_280 = 0,776 Nm. Následoval vzorek N2_280, dále N2_180 a největší hodnoty řezného momentu 0,850 Nm byly naměřeny u vzorku O2_180.



Obr. č. 67 Graf s vyhodnocením řezných momentů pro M4

Na obr. č. 68 je uveden graf s vyhodnocením řezných momentů při řezání závitů M3. Nejmenší hodnoty řezného momentu 0,401 Nm byly naměřeny u vzorku řezaného tavným způsobem, u kterého byly nastaveny otáčky pro řezání závitů na 280 min^{-1} . Druhé nejmenší momenty byly u vzorku N2_180, dále O2_280 a největší hodnoty řezného momentu 0,488 Nm byly naměřeny u vzorku O2_180.



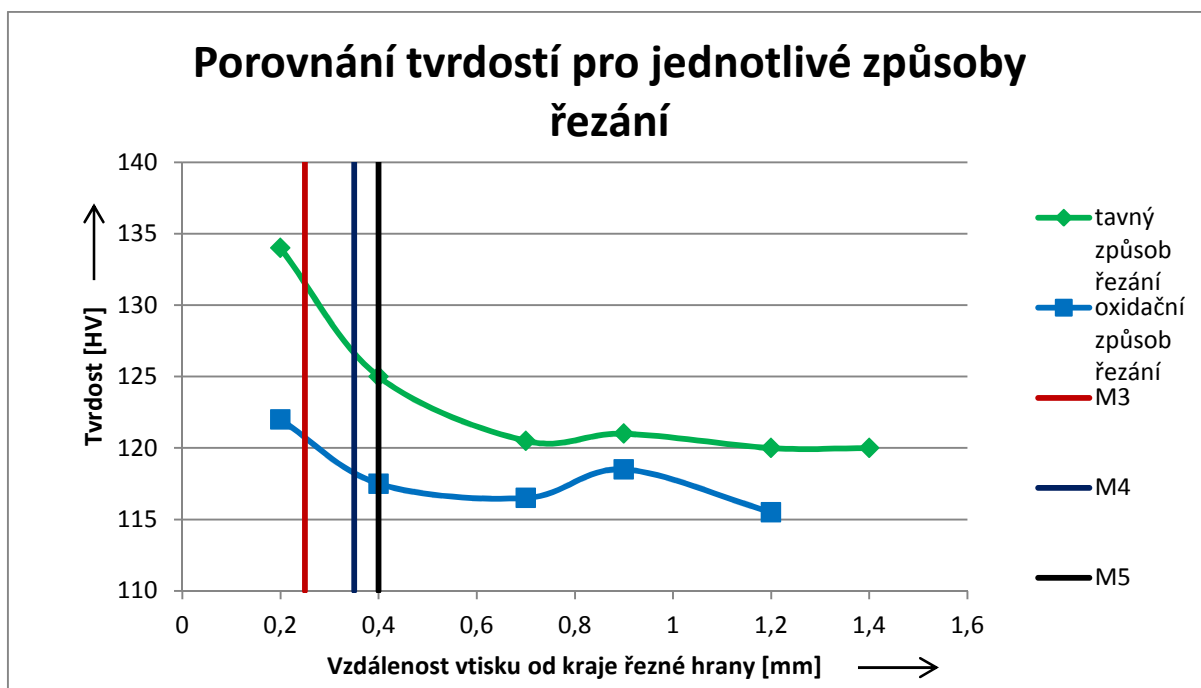
Obr. č. 68 Graf s vyhodnocením řezných momentů pro M3

Nejmenší řezný moment byl ve většině případů u vzorků řezaných tavným laserovým řezáním u N2_280. Při porovnávání čistě tavného a oxidačního způsobu vykazují ve většině případů menší zatížení závitníku řezné hrany otvorů tavného způsobu řezání. Nejmenší řezné momenty byly při vyšších řezných rychlostech, kterým odpovídaly otáčky 280 min^{-1} . Na vzorcích N2_280 u závitů M5 a M3 bylo naměřeno nejmenší zatížení závitníku řezným momentem. Pouze u závitů M4 bylo menší zatížení u vzorku O2_280. Při nižších otáčkách bylo menší zatížení závitníku vždy u tavně řezaného vzorku.

Řezání závitů je složitý komplexní proces, který může být ovlivněn mnoha činiteli, například mazáním, oxidy na povrchu řezné hrany, řeznou rychlostí, mechanismy utváření třísky, tvorbou nárůstku. Obecně se tvoří větší nárůstek u méně pevných materiálů a tím vzrůstá i řezný odpor.

Pro jednoznačné určení případu, kdy je zatížení závitníku nejmenší, by bylo nutné provést větší počet měření. Důležitá je však skutečnost, která byla jednoznačně prokázána, že mezi jednotlivými zatíženími závitníků nejsou nijak výrazné rozdíly. Tato skutečnost se dala očekávat již ze změřené tvrdosti řezných hran. Většinou se jednalo o rozdíly do 9,5 % z celkového zatížení. Maximální rozdíl byl naměřen u závitů M3, kde se rozdíl v zatěžujícím řezném momentu pohyboval do 19 % celkového momentového zatížení.

Dle získaných výsledků měření má tavný způsob řezání příznivější vliv na navazující operaci závitování, vykazuje menší zatížení zvolených závitníků, lze tedy předpokládat delší životnost použitých závitníků. Na obr. č. 69 je zobrazen průběh tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od řezné hrany, který byl získán při měření tvrdosti. Pro představu jsou v něm čarami znázorněny, kam zasahuje profil jednotlivých závitů.



Obr. č. 69 Průběh tvrdosti a profil jednotlivých závitů

4 TECHNICKO - EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [9], [34], [39], [42]

V experimentální části došlo k vyhodnocení vlastností řezných ploch. Při srovnání lze konstatovat, že oba způsoby laserového řezání jsou vyhovující a navzájem se výrazně neodlišují vzhledem k vlastnostem řezných ploch. Oba způsoby laserového řezání se pohybují v prvním tolerančním poli kvality řezu Rz5 určené dle ČSN EN ISO 9013. U oxidačního řezání je drsnost lepší, avšak tato drsnost není stejná v rámci celé řezné plochy, ke krajům se zvyšuje. Změřená tvrdost neodhalila výrazné rozdíly mezi oběma způsoby řezání. U tavného způsobu řezání je tvrdost maximálně o 11 % vyšší. Nelze tedy předpokládat výrazné ovlivnění navazujících operací, mezi které patří zejména řezání závitů a lisování lisovacích matic. To bylo prokázáno i při měření sil při řezání závitů. Jednotlivé způsoby laserového řezání se v kvalitě a ve vlastnostech řezné plochy téměř neodlišují, jeden z rozhodujících faktorů pro volbu způsobu laserového řezání budou náklady na výrobu.

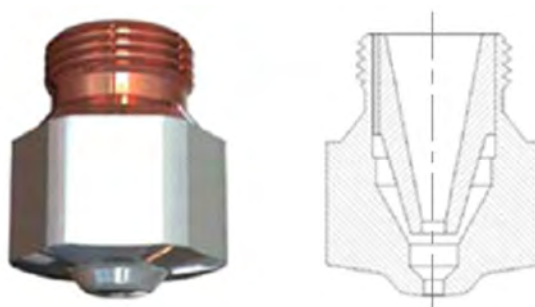
Z pohledu nákladů na výrobu se jednotlivé způsoby laserového řezání liší ve výrobním čase. Čas řezání dílu oxidačním způsobem je vyšší cca o 33 %. Další navýšení celkového výrobního času a nákladů na výrobu součástí by mohlo nastat právě u oxidačního způsobu řezání, při povrchových úpravách součástí. Řezné plochy jsou pokryty oxidy, které je nutno před povrchovými úpravami odstranit.

Mimo výrobních časů se jednotlivé způsoby liší hlavně v množství spotřebovaného procesního plynu a v jeho ceně. Drobné odlišnosti budou také v množství spotřebované elektrické energie, tam však lze předpokládat jen malý rozdíl. Spotřebu elektrické energie je možné zařadit mezi fixní náklady a považovat ji za stejnou pro oba dva způsoby. Ostatní náklady nejsou ovlivněny způsobem řezání a budou také stejné. Dopad na fixní náklady bude mít pouze spotřeba času. Pokud bude narůstat čas výroby, budou se úměrně zvyšovat tyto náklady, například mzda pracovníka atd.

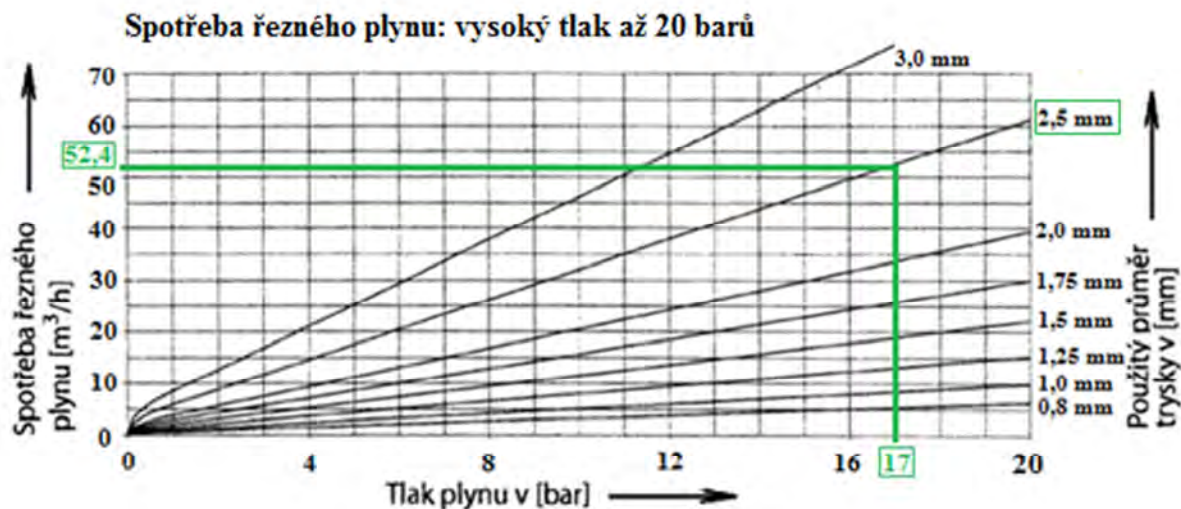
Na množství spotřebovaného procesního plynu má silný vliv použitý tlak plynu a použitá tryska, respektive její průměr. Tyto dva faktory určují objemový průtok plynu. Pro tavný způsob řezání byla použita tryska HK25 o průměru 2,5 mm, viz obr. č. 70. Použitý tlak byl pro obrys i otvory 17 barů. U oxidačního způsobu řezání byla použita tryska NK10, která má průměr 1,0 mm, viz obr. č. 71. Použitý tlak plynu činil 6 barů při řezání obrysu i otvorů. Hodinovou spotřebu plynů získáme z grafů spotřeby plynu pro daný laser. Pro určení spotřeby dusíku u tavného laserového řezání byl použitý graf, který je určen pro vysoké tlaky do 20 barů. Spotřeba dusíku byla stanovena na 52,4 m³/h, viz obr. č. 72. Spotřeba kyslíku u oxidačního řezání byla stanovena z grafu na 3,25 m³/h. pro nízké tlaky plynu do 6 barů, viz obr. č. 73.



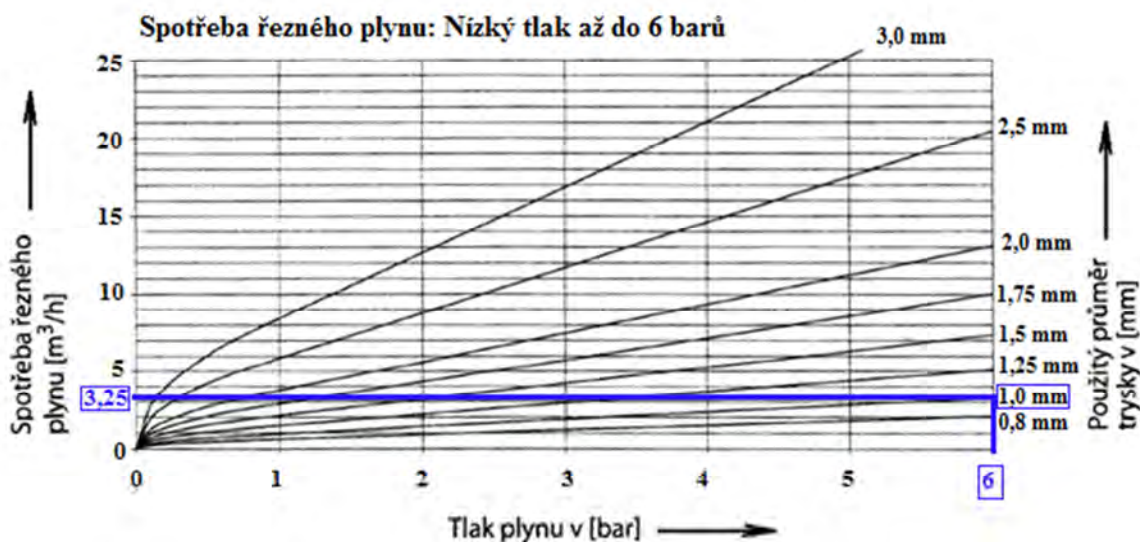
Obr. č. 70 Tryska HK25 [9]



Obr. č. 71 Tryska NK10 [9]



Obr. č. 72 Graf spotřeby řezného plynu pro tlaky do 20 barů [39]



Obr. č. 73 Graf spotřeby řezného plynu pro tlaky do 6 barů [39]

Nejdříve došlo k určení ceny pro oxidační způsob řezání. U oxidačního způsobu je použit jako procesní plyn kyslík. Propočty a zkušenosti firmy ukazují, že je pro firmu výhodnější odebírat od dodavatele kyslík ve svazku 12 ks lahví. Každá lahev má objem 50 litrů a je pod tlakem $p_1 = 200 \text{ barů} = 2 \cdot 10^7 \text{ Pa}$. Celkový objem lahví je $V_1 = 12 \cdot 50 = 600 \text{ l} = 0,6 \text{ m}^3$. Svazek lahví stojí 4335 Kč. Je nutné zjistit cenu za 1 m^3 plynu při atmosférickém tlaku a odhadované průměrné teplotě na dílně 15°C .

Hodnota atmosférického tlaku pro výpočet je přibližně $p_2 = 101325 \text{ Pa}$ a expanze kyslíku z lahví je uvažována jako izotermická expanze plynu. Konečný objem kyslíku V_2 se stanovuje pomocí stavové rovnice ideálního plynu ve tvaru pro izotermickou expanzi plynu:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (1.9)$$

Kde: V_1 – počáteční objem plynu – objem plynu v lahvi [m^3],

V_2 – konečný objem plynu – objem plynu při atmosférickém tlaku [m^3],

p_1 – počáteční tlak – tlak v lahvi [Pa],

p_2 – konečný tlak – okolní tlak [Pa].

Ze vztahu č. 1.9 byl vyjádřen konečný objem V_2 a dopočítán objem plynu po izotermickou expanzi na atmosférický tlak a teplotu 15°C:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad \Rightarrow \quad V_2 = \frac{p_1}{p_2} \cdot V_1 = \frac{2 \cdot 10^7}{101325} \cdot 0,6 = 118,43 \text{ m}^3$$

Cena za 1 m³ kyslíku je $\frac{4335}{118,43} = 36,60 \text{ Kč/m}^3$

Spotřeba kyslíku byla určena z obr. č. 73 na 3,25 m³/h. Náklady plynu za 1 hodinu oxidačního řezání jsou tedy $3,25 \cdot 36,60 = 118,96 \text{ Kč/h} = \frac{118,96}{60} = 1,98 \text{ Kč/min}$.

U tavného způsobu je spotřeba procesního plynu mnohem větší. V tomto případě má firma ujednáno odběr dusíku v kapalném stavu. 1 kg dusíku stojí 2,90 Kč. Hodinová spotřeba dusíku, jež byla určena z obr. č. 72, činí 52,40 m³/h. Dle tabulky č. 19 udávané dodavatelem plynu vznikne z 1 kg kapalného dusíku 0,855 m³ plynu při teplotě 15 °C a uvažovaném atmosférickém tlaku 101325 Pa. Ve sloupci s označením plyn jsou v tabulce navíc pro informaci uvedeny hodnoty výparného tepla a teplota varu při tlaku 1,013 barů. Ve třetím sloupci jsou litry kapaliny uvedeny při teplotě bodu varu.

Tab. č. 19 Přepočítávací tabulka pro plyny [34]

název plynu	plyn	m ³	litrů	kg
	kJ/kg °C	15°C 1,013 bar	kapaliny 1,013 bar	
kyslík	O ₂	1	1,172	1,337
	213	0,853	1	1,142
	-183	0,748	0,876	1
dusík	N ₂	1	1,447	1,17
	199	0,691	1	0,809
	-195,8	0,855	1,236	1
argon	Ar	1	1,197	1,669
	199	0,835	1	1,395
	-195,8	0,599	0,717	1
helium	He	1	1,336	0,167
	20,4	0,749	1	0,125
	-268,9	5,988	8	1
oxid uhličitý	CO ₂	0,637	1	1,178
	571,1	1	1,569	1,848
	-78,5 Subl	0,541	0,849	1
vodík	H ₂	1	1,188	0,0841
	454,3	0,842	1	0,0708
	-252,8	11,891	14,124	1
metan	CH ₄	1	1,588	0,671
	510,2	0,63	1	0,423
	-161,5	1,49	2,366	1

Jednoduchým výpočtem zjistíme, kolik kg dusíku je spotřebováno za hodinu řezání $\frac{52,40}{0,855} = 61,29 \text{ Kg/h}$. Nyní je možné stanovit náklady na plyn u tavného způsobu $61,29 \cdot 2,90 = 177,73 \text{ Kč/h} = \frac{177,73}{60} = 2,96 \text{ Kč/min}$.

Pro porovnání nákladů na procesní plyny při řezání stejného dílce bude cena vztažena na 1 metr řezu pro oba řezné parametry CW velké a CW malé. Z řezné rychlosti se nejdříve určí čas řezání dle vzorce pro rovnoměrný přímočarý pohyb:

$$t = \frac{s}{v} \quad (2.1)$$

Kde: s – dráha řezu [m] = 1 m,
 t – čas řezání [min],
 v – řezná rychlost [m/min],

Nejdříve je propočítána cena plynu u oxidačního řezání pro CW velké. Řezná rychlost činí 5700 mm/min = 5,7 m/min. Čas oxidačního řezání se určí dle vztahu č. 2.1:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{1}{5,7} = 0,175 \text{ min}$$

Procesní plyn na 1 metr řezu u oxidačního způsobu řezání pro CW velké stojí $0,175 \cdot 1,98 = 0,35 \text{ Kč/m}$

Stejným způsobem se určí cena procesního plynu u oxidačního řezání pro CW malé:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{1}{5} = 0,200 \text{ min}$$

Procesní plyn na 1 metr řezu u oxidačního způsobu řezání pro CW malé stojí $0,200 \cdot 1,98 = 0,40 \text{ Kč/m}$

Obdobným postupem se určí cena plynu pro tavné řezání. Řezná rychlost pro CW velké je 8700 mm/min = 8,7 m/min.

$$t = \frac{s}{v} = \frac{1}{8,7} = 0,115 \text{ min}$$

Procesní plyn na 1 metr řezu u tavného způsobu řezání pro CW velké stojí $0,115 \cdot 2,96 = 0,34 \text{ Kč}$

Pro CW malé je řezná rychlost 7700 mm/min = 7,7 m/min.

$$t = \frac{s}{v} = \frac{1}{7,7} = 0,130 \text{ min}$$

Procesní plyn na 1 metr řezu pro tavný způsob řezání pro CW malé stojí $0,130 \cdot 2,96 = 0,38 \text{ Kč}$

Z cen plynu vztaženým na 1 metr řezu, které byly vypočteny z udaných hodnot, je vidět, že tavné řezání je levnější pro oba dva použité soubory řezných parametrů CW velké i CW malé. Tento způsob řezání je také rychlejší a produktivnější. Při kratším výrobním čase budou menší i ostatní náklady, které se úměrně zvyšují s výrobním časem. Vzhledem k tomu, co je známo, budou stanoveny celkové náklady na 1 metr řezu. Výpočet bude prováděn za účelem srovnání konečných nákladů jednotlivých způsobů řezání. Cílem je také započítat mezi ostatní náklady i spočítanou cenu plynů a určit její procentuální část z celkové ceny.

V tabulce č. 20 na následující straně jsou uvedeny se zaokrouhlením náklady pro tavný způsob řezání vztaženy na 1 hodinu řezání. Celkové náklady za jednu hodinu řezání tavným způsobem byly stanoveny na $2296,21 \text{ Kč/h} = \frac{2296,21}{60} = 38,27 \text{ Kč/min}$. Cena dusíku činí 7,7 % z těchto celkových nákladů. Nyní může být stanovena celková cena za 1 metr řezu. Vypočítaná doba 1 metru řezu pro použité parametry CW velké byla 0,115 min, pro CW malé 0,130 min. Celková cena za jeden metr řezu pro použité parametry CW velké je $0,115 \cdot 38,27 = 4,40 \text{ Kč/m}$. a pro použité parametry CW malé je $0,130 \cdot 38,27 = 4,98 \text{ Kč/m}$

Tab. č. 20 Hodinová sazba za tavné laserové řezání [42]

Hodinová sazba za tavné laserové řezání			
<i>50 týdnů/rok</i>	<i>celkem hodin/rok</i>	<i>6000</i>	
<i>3 směny</i>	<i>doba odpisů</i>	<i>5 roků</i>	
<i>5 dní/týden</i>			
	cena jednotková		Kč/h
odpisy	15000000		500
elektrická energie	2,50 Kč/kWh	příkon 40 kWh	100
řezný dusík	3,39 Kč/m ³	52,40 m ³ /h	178
mzda operátora	180 Kč/hod	32 % odvody	238
spotřební díly	50000 Kč/rok		8
servis	120000 Kč/rok		20
celkem			1044
režie	200 %		2088
zisk	10 %		2297
cena plynu z celkových nákladů [%]			7,7

V tabulce č. 21 jsou uvedeny náklady pro oxidační způsob řezání vztaženo na 1 hodinu řezání

Tab. č. 21 Hodinová sazba za oxidační laserové řezání [42]

Hodinová sazba za oxidační laserové řezání			
<i>50 týdnů/rok</i>	<i>celkem hodin/rok</i>	<i>6000</i>	
<i>3 směny</i>	<i>doba odpisů</i>	<i>5 roků</i>	
<i>5 dní/týden</i>			
	cena jednotková		Kč/h
odpisy	15000000		500
elektrická energie	2,50 Kč/kWh	příkon 40 kWh	100
řezný kyslík	36,60 Kč/m ³	3,25 m ³ /h	119
mzda operátora	180 Kč/hod	32 % odvody	238
spotřební díly	50000 Kč/rok		8
servis	120000 Kč/rok		20
celkem			985
režie	200 %		1970
zisk	10 %		2167
cena plynu z celkových nákladů [%]			5,5

Celkové náklady za jednu hodinu řezání oxidačním způsobem byly stanoveny na 2166,89 Kč/h = $\frac{2166,89}{60} = 36,11$ Kč/min. Cena procesního plynu činí 5,5 % z těchto celkových nákladů. Vypočítaná doba 1 metru řezu pro použité parametry CW velké byla 0,175 min, pro CW malé 0,200 min. Celkové výdaje za jeden metr řezu pro použité parametry CW velké činí $0,175 \cdot 36,11 = 6,32$ Kč/m a pro jeden metr řezu parametry CW malé činí $0,200 \cdot 36,11 = 7,22$ Kč/m. Celkové shrnutí vypočítaných cen u jednotlivých způsobů je uvedeno v tabulce č. 22. Udané ceny jsou po zaokrouhlení.

Tab. č. 22 Celkové shrnutí cen u jednotlivých způsobů

způsob laserového řezání	cena plynu za 1 h řezání [Kč/h]	celková cena za 1 h řezání [Kč/h]	cena plynu za 1 m řezu [Kč/m]		celková cena za 1 m řezu [Kč/m]	
			CW velké	CW malé	CW velké	CW malé
tavný	178	2296	0,34	0,38	4,40	4,98
oxidační	119	2167	0,35	0,40	6,32	7,22

5 ZÁVĚR

Tato práce srovnává tavný a oxidační způsob laserového řezání a jejich vhodnost použití při výrobě součásti s názvem Trager konzola, která se vyrábí ve více variantách. V navrženém experimentu jsou posuzovány vlastnosti řezné hrany a jejich vliv na následující technologické operace, jež jsou zejména závitování a lisování matic.

V první části experimentu byla změřena drsnost řezných ploch u obou způsobů laserového řezání. Měření a následné vyhodnocení proběhlo dle normy ČSN EN ISO 9013. Dle této normy byly jednotlivé řezy zařazeny do tříd kvality řezu. Řezné plochy oxidačního způsobu se řadí do první třídy, stejně jako řezné plochy u tavného způsobu řezání. U oxidačního způsobu vykazovali řezné plochy menší drsnost, a jsou tedy položeny níže v této třídě. Při pořízení makrosnímků bylo zjištěno, že v místě měření, přibližně v třetině tloušťky řezné plochy, vykazovaly oxidačně řezané plochy velmi nízkou drsnost. Střední hodnota parametru drsnosti Rz5 byla 1,4 μm a u Ra činila 0,3 μm . Drsnost se však ke krajům řezných ploch prudce zvyšovala kvůli poměrně hlubokým rýhám na řezné hraně. Tavné řezání vykazovalo horší drsnost, střední hodnota Rz5 byla 7,6 μm a u Ra činila 1,6 μm . U tavného způsobu řezání se však dle snímků nevyskytovaly prudké změny drsnosti v rozsahu tloušťky řezné plochy.

Ve druhé části experimentu byla změřena tvrdost řezných hran a byl určen průběh tvrdosti od řezné hrany směrem do materiálu. U tavného způsobu řezání byla zjištěna vyšší tvrdost řezných hran než u oxidačního. Největší tvrdost se vyskytovala v těsné blízkosti řezných hran. Maximální průměrná hodnota tvrdosti byla 134 HV u tavného laserového řezání a 122 HV u oxidačního řezání. Tento rozdíl není velký, maximálně se průměrná tvrdost lišila o 11 %. Průběhy tvrdostí od řezné hrany jsou u obou způsobů řezání stejné.

Dle vlastností materiálu byly navrženy pro výrobu závitů vhodné závitníky. Následně byly změřeny řezné momenty při řezání závitů v součásti. Měření ukázalo jen velmi malé rozdíly v řezných momentech při porovnání mezi jednotlivými způsoby laserového řezání. Průměrný rozdíl v zatížení závitníků řeznými momenty byl 12 %. Ve většině případů byly méně zatěžovány závitníky u otvorů vyřezávaných tavným způsobem laserového řezání.

Pod mikroskopem byla na metalografických vzorcích zkoumána kvalita zalisování matic, ta byla přibližně stejná bez ohledu na způsob řezání výchozího otvoru. Nej kvalitnější zalisování bylo zjištěno u výchozího otvoru $\phi 4,34$ mm a $\phi 4,36$ mm. Tyto rozměry jsou o 0,01 mm a 0,03 mm větší než doporučený výchozí otvor $\phi 4,25+0,08$ mm. Lze doporučit řezat větší výchozí otvory pro lisování matic o rozměrech otvorů $\phi 4,34$ mm až $\phi 4,36$ mm.

V konečné fázi bylo provedeno ekonomické zhodnocení a porovnání jednotlivých způsobů. Dle dostupných dat bylo vypočteno tavné řezání jako levnější. 1 metr řezu tímto způsobem pro řezné parametry CW malé je o 1,92 Kč levnější. Při použití řezných parametrů CW velké byl tavný způsob levnější o 2,24 Kč/m. Vzhledem k cenám na 1 metr řezu vychází tavný způsob řezání jednoznačně lépe pro oba dva soubory řezných parametrů. Při srovnávání nejvíce záleží na ceně plynu a rychlosti řezání, která je u tavného způsobu o 33 % vyšší než u oxidačního. Rozdíly v rychlosti jsou zapříčiněny strojními parametry, které nejsou ze strany operátora ovlivnitelné, především mezi ně patří doba kontinuálního vpichu. Tento parametr mění celkový čas ve prospěch tavného řezání. Cena plynu je u oxidačního způsobu řezání nižší, a tedy i celková cena na 1 hodinu řezání je nižší. Tavný způsob je však o třetinu rychlejší a to má rozhodující vliv na celkové náklady.

Na základě výsledků měření bylo pro výrobu součástí Trager konzol doporučeno tavné řezání, které je ekonomičtější a produktivnější. Svými vlastnostmi řezné hrany má příznivější vliv na závitování a nebyl zde zjištěn negativní dopad na lisování matic. Řezná hrana je nezoxidovaná, a tedy výhodnější vzhledem k možným navazujícím povrchovým úpravám. Drsnost řezných ploch je v celé ploše bez skokových změn a řadí se do první třídy kvality.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [10]

- 1 DOČEKAL, Miroslav. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb- YAG*. Brno, 2013.
Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/27382/2013_BP_Docekal%20Miroslav_133448.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
- 2 AMADA. *Cutting Know-how for Amada lasers*. Schaumburg, 2011, 18 s.
Dostupné z: <http://www.amada.com/>
- 3 AQUADEM S. R. O. *Aquadem s. r. o* [online]. Brno, 2012 [cit. 2015-02-20].
Dostupné z: <http://www.aquadem.cz>
- 4 ARCUS ENGINEERING. *Arcus Engineering: Nýtovací a upevňovací prvky*. Brno, 2015, 32 s. Dostupné z:
http://www.avdel.eu/pdf/lisovaci_a_spojovaci_prvky/lisovaci_prvky_cely_katalog.pdf
- 5 Autogen. *Řízené stroje: Český výrobce laserových automatů* [online]. 2014. vyd. [cit. 2014-11-04]. Dostupné z: <http://www.cncstroje.cz/autogen>.
- 6 BARTÁK, Jiří, Vladimír BĚLOHUBÝ, Vladimír BUBENÍK, Rudolf KOVAŘÍK, Vladimír KUDĚLKA, Václav PILOUS, Pavel POKORNÝ a Jiří SIKA. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2002, 418 s. ISBN 80-857-7197-7.
- 7 BENKO, Bernard, Peter FODEREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. 1.vydanie. Bratislava: STU, 2000. 4859. ISBN 80-227-1425-9
- 8 BOHDAN BOLZANO S. R. O. *Bolzano* [online]. Kladno, 2015 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s355j2drive-s355j2g3>
- 9 BYSTRONIC. *Ceník spotřebních dílů, čoček a příslušenství pro Bystronic: Laserové pálicí stroje*. Bystronic, 2015, 15 s. Dostupné z:
<http://www.katalog.apl-cutting.com/laser/bystronic.pdf>
- 10 *Citace.com* [online]. 2004. vyd. KMa Webdesing, 2004, 25.03.2013 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://www.citace.com/>
- 11 ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. Praha: XEROX CR, 2003.
- 12 DIRECT INDUSTRY. *Direct industry: the Online Industrial Exhibition* [online]. Direct industry, 2015 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com>
- 13 DVORÁK, J.: *Integrita rozhraní materiálu obráběných progresivními technologiemi*. Disertační práce. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. Počet stran 109, počet příloh 3. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

- 14 DVOŘÁK, Jiří. *Návrh technologie výroby „dílu svěřací kroužek“* [online]. Brno, 2009 [cit. 2015-01-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=13655. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Michaela Marečková.
- 15 EN ISO 9013. *Evropská norma EN ISO 9013*. Praha: XEROX CR, s.r.o, 2002.
- 16 FINDA, Luděk a Roman FALTUF. Akademie tváření: Děrování s přidanou hodnotou. *Průmyslové spektrum: Děrování s přidanou hodnotou* [online]. 2010, roč. 2010, s. 72, 17.05.2010 [cit. 2015-01-24]. DOI: 100616. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani.html>
- 17 *Fokusovatelnost a kvalita svazku: ORE přednášky*. Praha, 2015. Dostupné z: <http://people.fjfi.cvut.cz/kubecvac/ORE/>
- 18 FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT. *Opening – fiber/disc lasers versus direct diode lasers*. Fraunhofer IWS, 2014, 19 s. Dostupné z: <http://www.iws.fraunhofer.de/en>
- 19 HÁJEK, Jaroslav. Praktické zkušenosti s využitím etylenu při řezání. *Praktické zkušenosti s využitím etylenu při řezání* [online]. MM, 2007 [cit. 2014-11-05]. <http://www.mmspektrum.com>. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prakticke-zkusenosti-s-vyuzitim-etylenu-pri-rezani.html>
- 20 HÝŘEŠ, Ondřej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Dělení kovových materiálů okružnou pílou, vodným proudem a plazmovým oblúkom*. Ostrava: Jiří Pustina, 2007. ISBN 978-80-8073-769-6.
- 21 CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi I.: Přednáška č.5* [on-line]. 2011. vyd. Olomouc: SLO UP a FZÚ AV/ČR, 2011, 18 s. [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_5prez.pdf
- 22 CHPS: Materiály. [online]. [cit. 2014-11-10]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/materialy>
- 23 ISOTEK. *Laboratorní přesná pila MIKRON 110* [on-line]. Žilina, 2008, 4 s. [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: <http://www.isotek.sk/index.html>
- 24 *JENOPTIK: Drsnost povrchu* [online]. Teplice, 2015 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.hommel-etamic.cz>
- 25 KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0
- 26 KAŠPAR, Jan. *Tepelné dělení kyslíkem* [online]. 2011, 2011(4) [cit. 2014-11-04]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/tepelne-deleni-materialu-kyslikem.html>
- 27 KOLEKTIV AUTORŮ. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*, 1 vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1
- 28 KOPŘIVA, A. *Měření tvrdosti materiálů a zpracování naměřených výsledků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 34 s., 4 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda. Jaroslav Dvořák.

- 29 Lao Lasery a optika. KOŘÁN, Pavel. *Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting)* [online]. Praha, 20.05.2011 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- 30 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.
- 31 Laser devices: Transverse Modes. *Laser devices* [online]. [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://www.ryerson.ca/~kantorek/ELE884/Lasers.htm>
- 32 Laser Shop. [online]. [cit. 2014-11-14]. Dostupné z: <http://laser-shop.cz/cs/laser-co2/600-18mm-cocka-pro-co2-lasery.html>
- 33 *Lasers and laser cutting*. 1994. vyd. Trumpf, 1994. Dostupné z: www.trumpf.com
- 34 LINDE. *Přepočítavací tabulka pro plyny: Zaokrouhlené hodnoty*. Praha: The Linde Group, 2014, 2 s. Dostupné z: http://www.linde-gas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/A7%20tabulka%20oprava79_99241.pdf
- 35 MÁDR, Vilém. *Laserové záření v důlním měřictví a geodézii*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2013, 98 s. ISBN 978-80-248-3137-4
- 36 MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
- 37 Možnosti zvyšování produktivity strojního dělení plamenem. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2002, roč. 2002, č. 10 [cit. 2015-01-25]. kód článku 021010. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moznosti-zvysovani-produktivity-strojního-deleni-plamenem.html>
- 38 MRŇA, Libor. 2015. *Dělení a svařování svazkem plazmatu* [online]. Brno, 27 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__deleni_a_svarovani_plasmou_2013__mrna.pdf
- 39 MRŇA, Libor. 2015. *Konzultace*. Brno.
- 40 MRŇA, Libor. 2015. *Technologie využívající laser* [online]. Brno, 28 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani_laserem_2013__mrna.pdf
- 41 MRŇA, Libor. 2015. *Základy laserové techniky* [online]. Brno, 22 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techniky_2013__mrna.pdf
- 42 MRŇA, Libor. *Ekonomika technologií*. Brno, 2015, 6 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/ekonomika_technologii__mrna.pdf
- 43 NAREX ŽĎÁNICE, spol. s r. o. *Narex žďánice: Katalog*. Žďánice, 2015. Dostupné z: <http://www.narexd.cz/files/catalogue27.pdf>
- 44 NOVEL. *Materiálové normy* [online]. MaM Multimedia, 2011 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.novel.sk/materialove-normy/>

- 45 ONTARIOLASERCUTTING. *Ontario laser cutting inc* [online]. 2014
[cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://ontariolasercutting.com/>
- 46 ORISHICH, A.M., A.G. MALIKOV, V.B SHULYATYEV
a A.A GOLYSHEV. ELSEVIER B.V. Experimental comparison of laser
cutting of steel with fiber and CO2 lasers on the basis of minimal roughness:
8th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014.
Physic procedia [online]. 2014, č. 56, 865 - 874 [cit. 2015-02-24].
DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.106. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187538921400251X>
- 47 PEŠATA, Jan. *Integrita povrchu po řezání vodním paprskem* [online]. Brno,
2010 [cit. 2015-01-22]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29708.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce
Jaroslav Dvořák.
- 48 Pkit: Řezání vodním paprskem. [online]. Praha: Victory design, 2008
[cit. 2014-11-10]. Dostupné z: <http://www.pkit.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>
- 49 PROCHÁZKA, Jiří, Miroslav ZAPOTIL, Milan NĚMEC a Jiří NOVOTNÝ.
Technologie slévání, tváření a svařování. Vyd. 3. Praha: Ediční středisko
ČVUT, 1990, 343 s. 7037. ISBN 80-010-0345-0.
- 50 RENNER, Vratislav. Technická měření: Zkoušky mechanických vlastností
materiálů. [online]. [cit. 2014-11-07]. Dostupné z:
http://xyz12345.wz.cz/tmr/zkousky_mech.html
- 51 REUSSER DESIGN LLC. *EDGE manufacturing inc* [online]. 2015
[cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <https://edgemanufacturing.com/services/laser-cutting>
- 52 ROPA. *ROPA* [online]. Herrngiersdorf, 2015 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z:
<http://www.ropa-maschinenbau.de/company/metallbau>
- 53 RÚTERING, Marus. 2011. Co rozhoduje při volbě typu laseru.
MM Průmyslové spektrum: Technologie spojování - dělení materiálů
Nekonvenční technologie [online]. 2011(9): 1 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
- 54 RUUKKI CZ S. R. O. *Ocelové pláty, plechy a svitky plechů válcované za tepla: Výrobní program*. Praha, 2015, 20 s. Dostupné z:
http://www.ruukki.cz/~media/Czech%20Republic/Files/Metals/RUUKKI_katalog_Vyrobní_program.pdf
- 55 Schinkmann: Řezání plazmou, plamenem. SCHINKMANN. *Schinkmann: Řezání plazmou, plamenem* [online]. Mladá Boleslav [cit. 2014-11-12].
Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/rezani-plazmou-plamenem>
- 56 STRUERS. *Struers: Ensuring Certainty* [online]. 2015 [cit. 2015-03-19].
Dostupné z: <http://www.struers.com>
- 57 ŠMÍD, Jiří. Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser?. *Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser?* [online]. 2007, roč. 2007, č. 3
[cit. 2014-11-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser.html>
- 58 ŠMÍD, Jiří. Trumpf, Laser a Intech 2011, Část 2. *MM průmyslové spektrum*
[online]. 2012, č. 1 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/trumpf-laser-a-intech-2011-cast-2.html>

- 59 ŠPROCH, Daniel. *Návrh výroby držáku klimatizace* [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-01-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65236. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Eva Peterková.
- 60 ŠTOKMAN, Michal. *Analýza řezných sil při řezání závitů: Cutting force analysis when tapping* [online]. Brno, 2014 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84147. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Miroslav Píška.
- 61 Tavné řezání. [online]. [cit. 2014-11-02]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/tavne-rezani.html>
- 62 Trumpf. *Trumpf* [online]. 2015. vyd. 2015 [cit. 2015-01-24]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com>
- 63 Učíme v prostoru: Encyklopedie - Drtič kamene. PATA, Vladimír. *Učíme v Prostoru: Encyklopedie - Drtič kamene* [online]. [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2076
- 64 Vytech [online]. Brno, 2015 [cit. 2015-01-23]. Dostupné z: <http://www.vytech.cz/clanky/technologie/>
- 65 YDIN, Petr V., Alexandr V. ZAITSEV, Oleg B KOVALEV a Grigory V. ERMOLAEV. Fundamental study of CO₂- and Fiber laser cutting of industrial materials with high speed visualization technique. *Lane 2014: 8 th international conference on photonic technologies* [online]. 2014, č. 1, s. 1-9 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: http://lane-conference.org/downloads/IndustrialContributions/LANE2014_Ydin_Fundamental_study_of.pdf
- 66 ZAITSEV a Grigory V. ERMOLAEV. Combustion effects in laser-oxygen cutting: basic assumptions, numerical simulation and high speed visualization. In: *Science Direct* [online]. Novosibirsk, Rusko, 2014 [cit. 2015-02-05]. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.105. Dostupné z: http://ac.els-cdn.com/S1875389214002508/1-s2.0-S1875389214002508-main.pdf?_tid=41d7204e-ad2b-11e4-a599-00000aacb35f&acdnat=1423136382_f0e03d8072f3cdf90d238498c82242f0

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	[-]	Součinitel absorpce
AJW		(Abrasive Water Jet Machine) – řezání abrazivním vodním paprskem
Al		Hliník
A ₈₀	[%]	Tažnost
a	[mm]	Tloušťka řezu
BPP	[mm · mrad]	(Beam Parameter Product) – parametr popisující kvalitu kruhově symetrických svazků
<i>b</i> *	[m]	Optimální šířka řezné spáry
C		Uhlík
CO ₂		Oxid uhličitý
CNC		(Computer Numerical Control) - Počítačem číslicově řízený stroj
Cu		Měď
cw		(Continuous Wave) – Kontinuální režim laseru
D	[m ² · s ⁻¹]	Koeficient difuze
d	[mm]	Průměr nezaostřeného laserového paprsku
<i>d_m</i>	[mm]	Průměr laserového paprsku měřený v místě, kde je intenzita ($\frac{1}{e^2}$) násobkem intenzity na jeho ose
<i>d_o</i>	[mm]	Průměr paprsku před čočkou
Er		Chemický prvek erbium
f	[mm]	Ohnisková vzdálenost čočky
He		Helium
I	[W/mm ²]	Plošná intenzita výkonu
I ₀	[W/mm ²]	Intenzita záření ve středu paprsku
k	[K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti materiálu
LASER		(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) - zesílení světla stimulovanou emisí záření
Lr	[mm]	Základní délka pro snímání profilu drsnosti materiálu
M _c	[Nm]	Řezný moment
Mn		Mangan
Nd		Chemický prvek neodým
N ₂		Dusík
OX		Oxidace – povrchová úprava
P		Fosfor
<i>Pe</i>	[-]	Pecletovo číslo
<i>Pe</i> *	[-]	Bezrozměrný vnesený výkon
p ₁	[Pa]	Počáteční tlak plynu
P ₂	[Pa]	Konečný tlak plynu
R	[μm]	Parametr profilu vypočítaný z profilu drsnosti

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
Ra	[μm]	Průměrná aritmet. úchylka profilu povrchu
ReH	[MPa]	Horní mez kluzu materiálu
R _f	[-]	Součinitel odrazivosti (reflexivity)
Rm	[MPa]	Mez pevnosti materiálu
Rz	[μm]	Největší výška základního profilu
Rz5	[μm]	Průměrná výška profilu
r	[mm]	Vzdálenost od osy paprsku, Natavení horní hrany
r ₀	[mm]	Identifikovaný poloměr paprsku
S		Síra
Si		Křemík
s	[m]	Dráha řezu
TEM		(Transversal Electromagnetic Mode of order mn) – módová) - struktura paprsku v pořadí mn
TEM 00	[K]	(Transversal Electromagnetic Mode of order 00) Módová struktura paprsku 00) – Gaussovo rozložení
T	[°C]	Teplota tavení
Tm		Chemický prvek thulium
t	[s; min]	Čas
V		Vanad
V*	[$m \cdot s^{-1}$]	Optimální řezná rychlost
V ₁	[m ³]	Počáteční objem
V ₂	[m ³]	Konečný objem
v	[$m \cdot \text{min}^{-1}$]	Řezná rychlost
W	[W]	Výkon laseru
WJM		(Water Jet Machining) řezání vodním paprskem
YAG		Yttrium Aluminum Grenade – Yttriový hlinitý granát ($Y_3Al_5O_{12}$)
Yb		Chemický prvek ytterbium
ln	[mm]	Vyhodnocovaná délka při měření drsnosti
lr	[mm]	Základní délka při měření drsnosti
u	[mm]	Kolmost řezu v normě ČSN EN ISO 9013
z	[mm]	Hloubka ostrosti
δ	[-]	Směrodatná odchylka daného souboru
ε	[$H \cdot m^{-1}$]	Dialektická permeabilita
Θ	[rad]	Rozbíhavost laserového paprsku (divergence)
λ	[mm]	Vlnová délka záření
ν	[Hz]	Frekvence dopadající záření
π	[-]	Ludolfovo číslo rovno přibližně 3,1415
σ	[Ω^{-1}]	Elektrická vodivost materiálu
ϕ	[mm]	Průměr

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1 Laserové řezání.....	9
Obr. č. 2 Nákres Trager konzoly	10
Obr. č. 3 Příklad Trager konzoly	10
Obr. č. 4 Hořák pro strojní řezání	11
Obr. č. 5 Průchod plynu hořákem	12
Obr. č. 6 Řezání plazmou	12
Obr. č. 7 Řezání vodním paprskem	13
Obr. č. 8 Řezný proces AWJ	14
Obr. č. 9 Děrovací kombinovaný lis	15
Obr. č. 10 Razník a matrice	15
Obr. č. 11 Řezání laserem	16
Obr. č. 12 Divergence laserového paprsku.....	19
Obr. č. 13 TEM 00	19
Obr. č. 14 Top hat	20
Obr. č. 15 Zaostření paprsku čočkou.....	20
Obr. č. 16 ZnSe čočka	21
Obr. č. 17 SLAB CO ₂ laser	21
Obr. č. 18 Princip vláknového laseru	22
Obr. č. 19 Vláknový laser	22
Obr. č. 20 Schéma diskového laseru.....	23
Obr. č. 21 Buzení diskového laseru	23
Obr. č. 22 Ohnisko - oxidační řezání.....	25
Obr. č. 23 Schéma vysokorychlostního snímání	26
Obr. č. 24 Dynamika tvorby řezné spáry u vláknového laseru.....	27
Obr. č. 25 Řezání 20 mm uhlíkové oceli CO ₂ laserem.....	28
Obr. č. 26 Hloubka přenosu kyslíku z trysky	28
Obr. č. 27 Martenzitová vrstva na řezné hraně.....	29
Obr. č. 28 Ohnisko - tavné řezání.....	29
Obr. č. 29 Tok taveniny u tavného řezání pro CO ₂ laser.....	30
Obr. č. 30 Tok taveniny u tavného řezání pro vláknový laser	31
Obr. č. 31 Střída frekvence.....	33
Obr. č. 32 Vliv řezné rychlosti	33
Obr. č. 33 Vliv výkonu - silný materiál	34
Obr. č. 34 Vliv výkonu - tenký materiál.....	34
Obr. č. 35 Vliv ohniska – pro tlustý materiál	34
Obr. č. 36 Vliv ohniska – pro tenký materiál	35
Obr. č. 37 Toleranční pole do 30 mm tloušťky Rz5	36
Obr. č. 38 Vzor zápisu ČSN EN ISO 9013	37
Obr. č. 39 Laserový řezací stroj BySprint	38
Obr. č. 40 Vyříznutý vzorek	38
Obr. č. 41 Schéma měření	40
Obr. č. 42 Zařazení do tříd kvalit řezu dle ČSN EN ISO 9013	41
Obr. č. 43 Zpracování hodnot Rz5 dle ČSN EN ISO 9013.....	41
Obr. č. 44 Řezná plocha – oxidační způsob	42
Obr. č. 45 Řezná plocha – tavný způsob	42
Obr. č. 46 Zpracování hodnot Ra	42
Obr. č. 47 Ustavení vzorku.....	43
Obr. č. 48 Měření drsnosti	43
Obr. č. 49 Zalisovaný vzorek N ₂	44

Obr. č. 50 Zalisovaný vzorek O ₂	44
Obr. č. 51 Pila Mikron 110	44
Obr. č. 52 Metalografický lis	45
Obr. č. 53 Zařízení pro výbrus vzorků	45
Obr. č. 54 Metalografický vzorek N ₂	45
Obr. č. 55 Dvě řady vtisků při měření tvrdosti od řezné hrany	46
Obr. č. 56 Tvrdost pro tavný způsob řezání	47
Obr. č. 57 Metalografický vzorek O ₂	47
Obr. č. 58 Tvrdost pro oxidační způsob řezání.....	48
Obr. č. 59 Průběh tvrdostí pro tavný a oxidační způsob řezání.....	49
Obr. č. 60 Mikroskop Olympus Lext OLS 3100	49
Obr. č. 61 Řezná hrana N ₂	50
Obr. č. 62 Řezná hrana O ₂	50
Obr. č. 63 Závitník 1540	50
Obr. č. 64 Kistler 9272	50
Obr. č. 65 Schéma měřicí aparatury	50
Obr. č. 66 Graf s vyhodnocením řezných momentů pro M5.....	51
Obr. č. 67 Graf s vyhodnocením řezných momentů pro M4.....	52
Obr. č. 68 Graf s vyhodnocením řezných momentů pro M3.....	52
Obr. č. 69 Průběh tvrdosti a profil jednotlivých závitů	53
Obr. č. 70 Tryska HK25	54
Obr. č. 71 Tryska NK10	54
Obr. č. 72 Graf spotřeby řezného plynu pro tlaky do 20 barů.....	55
Obr. č. 73 Graf spotřeby řezného plynu pro tlaky do 6 barů.....	55

SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1 Teploty plazmy	13
Tab. č. 2 Vlnové délky vláknového laseru dle dopujícího prvku	22
Tab. č. 3 Absorpce vybraných materiálů.....	32
Tab. č. 4 Toleranční pole Rz5.....	36
Tab. č. 5 Toleranční pole u	37
Tab. č. 6 Řezné parametry pro tavný způsob	39
Tab. č. 7 Řezné parametry pro oxidační způsob.....	39
Tab. č. 8 Parametry oceli S355J2	39
Tab. č. 9 Hodnoty Rz5 pro tavný způsob	40
Tab. č. 10 Hodnoty Rz5 pro oxidační způsob	40
Tab. č. 11 Hodnoty Ra pro tavný způsob řezání	43
Tab. č. 12 Hodnoty Ra pro oxidační způsob řezání.....	43
Tab. č. 13 Parametry pily Mikron 110.....	44
Tab. č. 14 Průměr otvorů pro metalografický vzorek N ₂	46
Tab. č. 15 Tvrdost pro metalografický vzorek N ₂	46
Tab. č. 16 Průměr otvorů pro metalografický vzorek O ₂	47
Tab. č. 17 Tvrdost pro metalografický vzorek O ₂	48
Tab. č. 18 Řezné rychlosti	51
Tab. č. 19 Přepočítávací tabulka pro plyny	56
Tab. č. 20 Hodinová sazba za tavné laserové řezání	58
Tab. č. 21 Hodinová sazba za oxidační laserové řezání	58
Tab. č. 22 Celkové shrnutí cen u jednotlivých způsobů.....	59

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha číslo 1	Závislost BPP jednotlivých typů laserů na výkonu	1/1
Příloha číslo 2	Závislost Pecletova čísla na bezrozměrném vneseném výkonu	1/1
Příloha číslo 3	Závislost průměrné drsnosti řezné plochy na řezné rychlosti	1/1
Příloha číslo 4	Závislost vnesené energie na jednotku objemu odebraného materiálu z řezné spáry	1/1
Příloha číslo 5 [67]	Dynamika tvorby řezné spáry - simulace	1/1
Příloha číslo 6 [67]	Výsledky numerické simulace vlivu čistoty kyslíku na intenzitu exotermické reakce při oxidačním řezání.	2/2
Příloha číslo 7 [67]	Metalurgické interakce při řezném procesu	2/2
Příloha číslo 8 [7]	Porovnání absorpce různých materiálů v závislosti na vlnové délce záření	1/1
Příloha číslo 9 [7]	Závislost absorpce na teplotě	1/1
Příloha číslo 10 [66]	Mechanismus přechodu na samo udržitelný režim spalování	1/1
Příloha číslo 11 [15]	Toleranční pole kvality pro Rz5	1/1
Příloha číslo 12 [15]	Toleranční pole přesnosti pro u	1/1
Příloha číslo 13 [3]	Laserový řezací stroj BySprint	1/1
Příloha číslo 14 [3]	Řezný plán vzorků	1/1
Příloha číslo 15 [3]	Materiálový list	1/1
Příloha číslo 16 [1]	Drsnoměr MarSurf M300	2/2
Příloha číslo 17	Povrch vzorků u tavného a oxidačního způsobu řezání	4/4
Příloha číslo 18 [4]	Lisovací matice	1/1
Příloha číslo 19	Postup při dělení zalisovaného vzorků	1/1
Příloha číslo 20	Fotografie z dělení zalisovaných vzorků	1/1
Příloha číslo 21	Fotografie z přípravy metalografických vzorků	1/1
Příloha číslo 22	Metalografické zařízení Struers Tegramin – 20	1/1
Příloha číslo 23	Metalografický vzorek N ₂	1/1
Příloha číslo 24	Tvrdoměr Zwick 3212	1/1
Příloha číslo 25	Metalografický vzorek O ₂	1/1
Příloha číslo 26	Makro metalografického vzorku N ₂	3/3
Příloha číslo 27	Makro metalografického vzorku O ₂	3/3
Příloha číslo 28	Snímky pořízené na laserovém mikroskopu N ₂	3/3
Příloha číslo 29	Snímky pořízené na laserovém mikroskopu O ₂	3/3
Příloha číslo 30	Část z Katalogu - strojní závitníky Narex Žďánice	1/1
Příloha číslo 31	Fotografie z měření řezných momentů závitníků	1/1

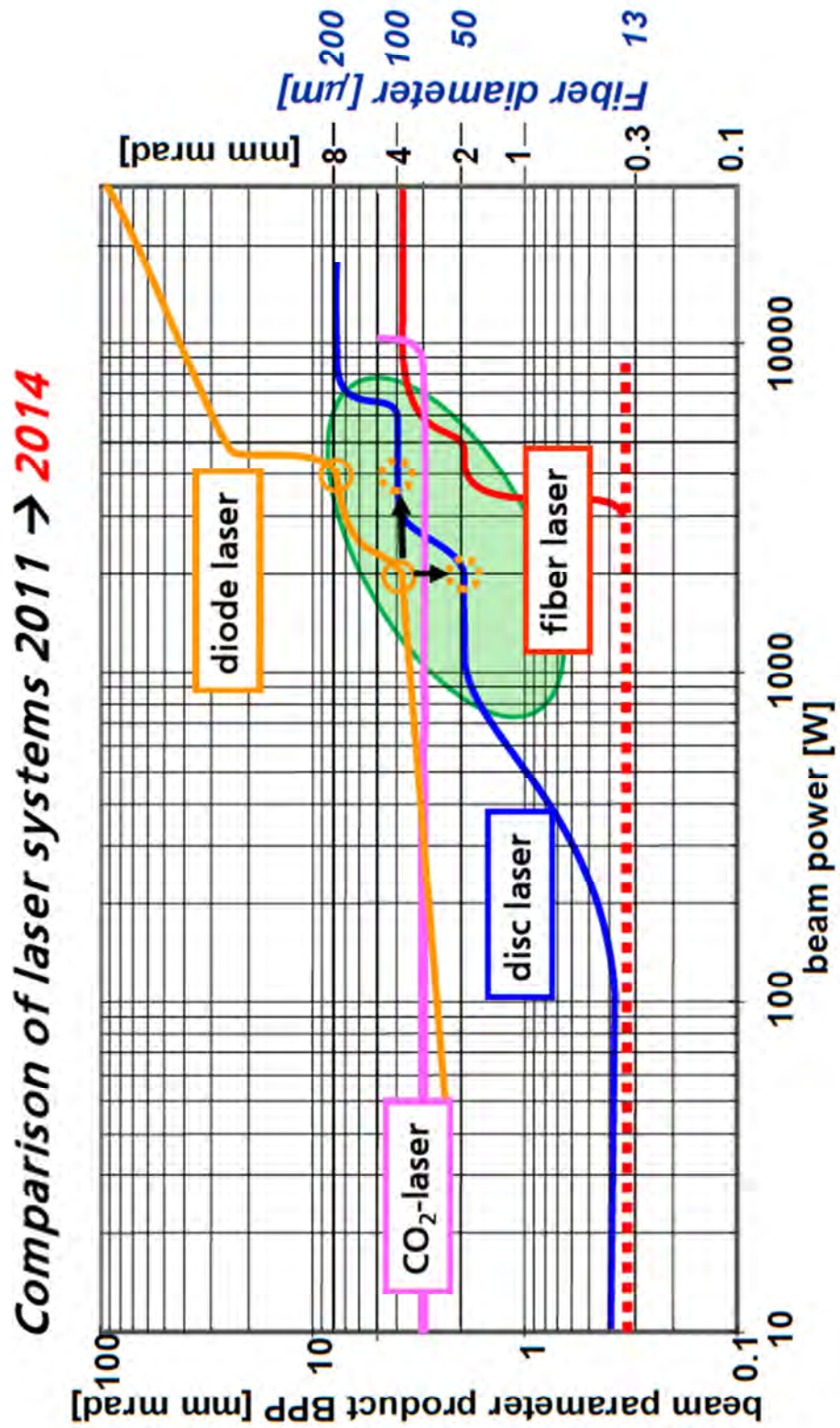
SEZNAM VÝKRESŮ

Výkres číslo 1	Firemní výkresová dokumentace_1 – Trager konzola
Výkres číslo 2	Firemní výkresová dokumentace_2 – Trager konzola
Výkres číslo 3	Vzorek

Příloha číslo 1 [18]

Závislost BPP jednotlivých typů laserů na výkonu

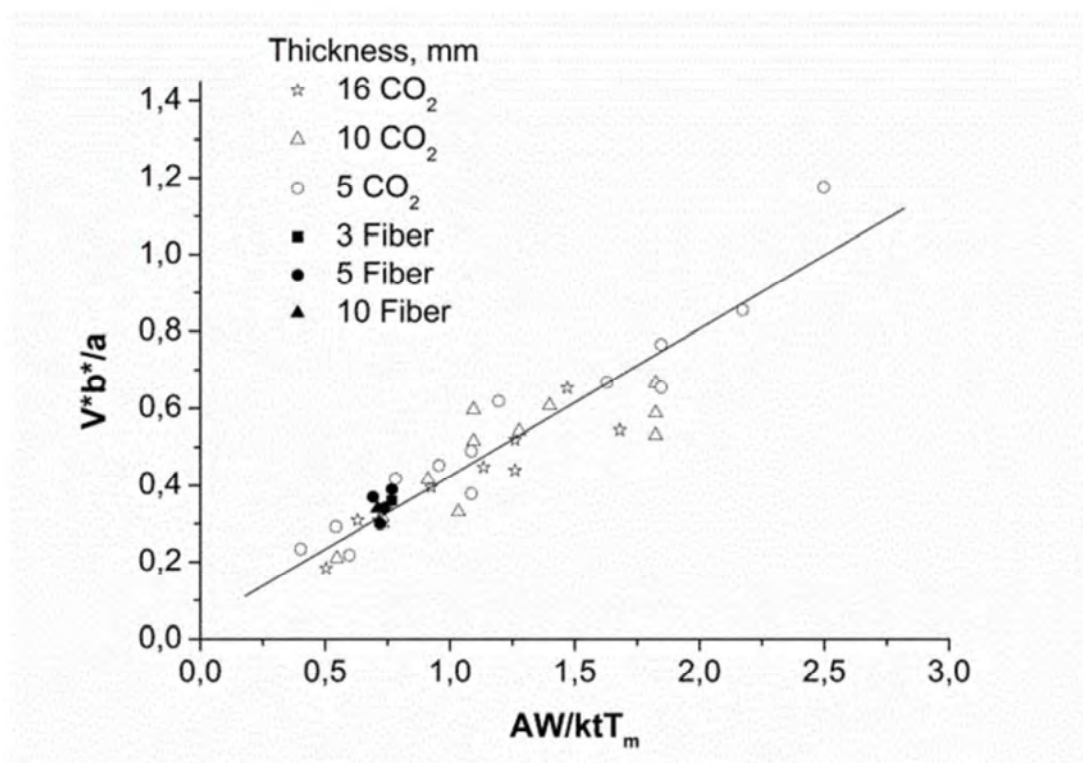
1/1



Příloha číslo 2 [46]

Závislost Pecletova čísla na bezrozměrném vneseném výkonu

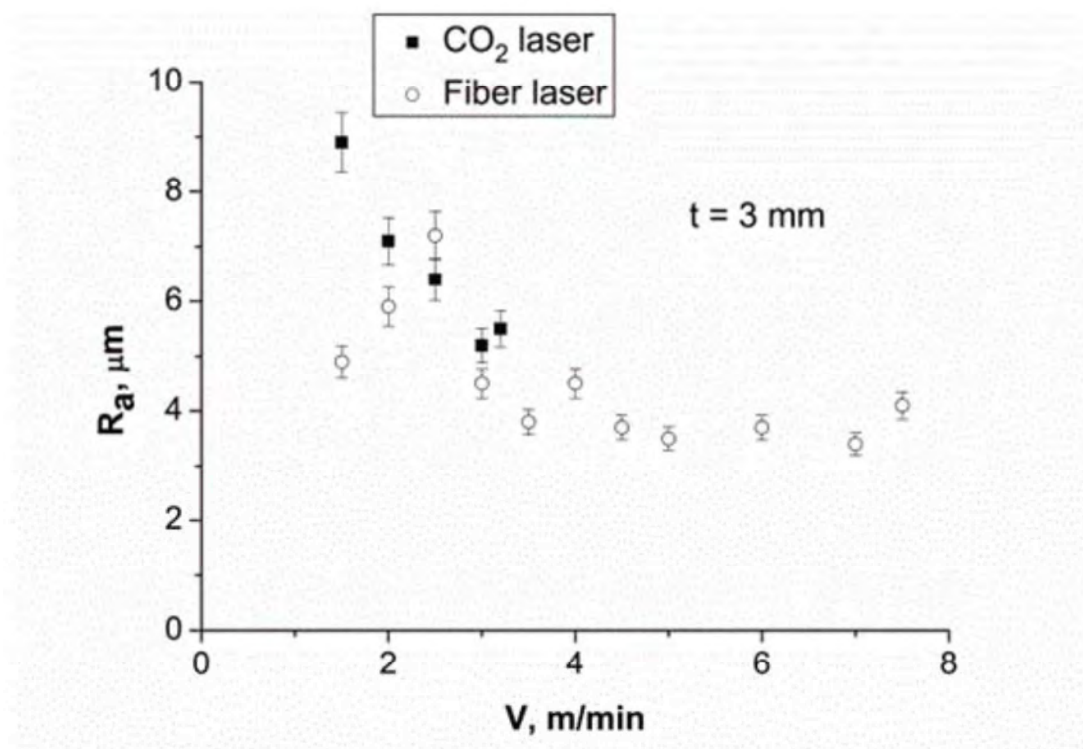
1/1



Příloha číslo 3 [46]

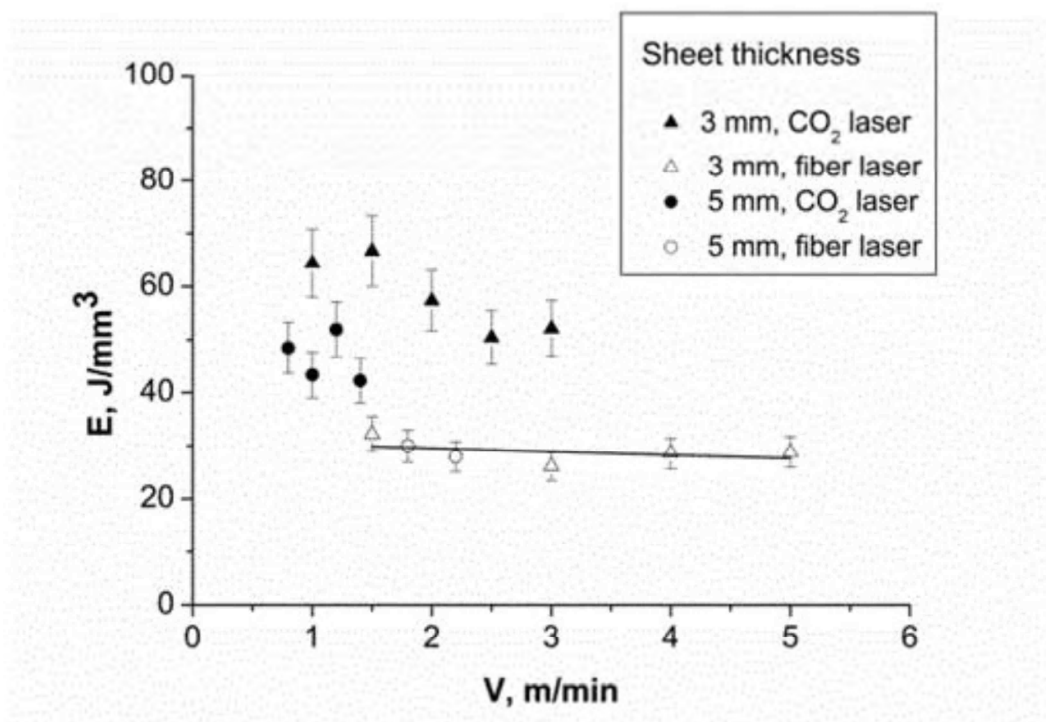
Závislost průměrné drsnosti řezné plochy na řezné rychlosti

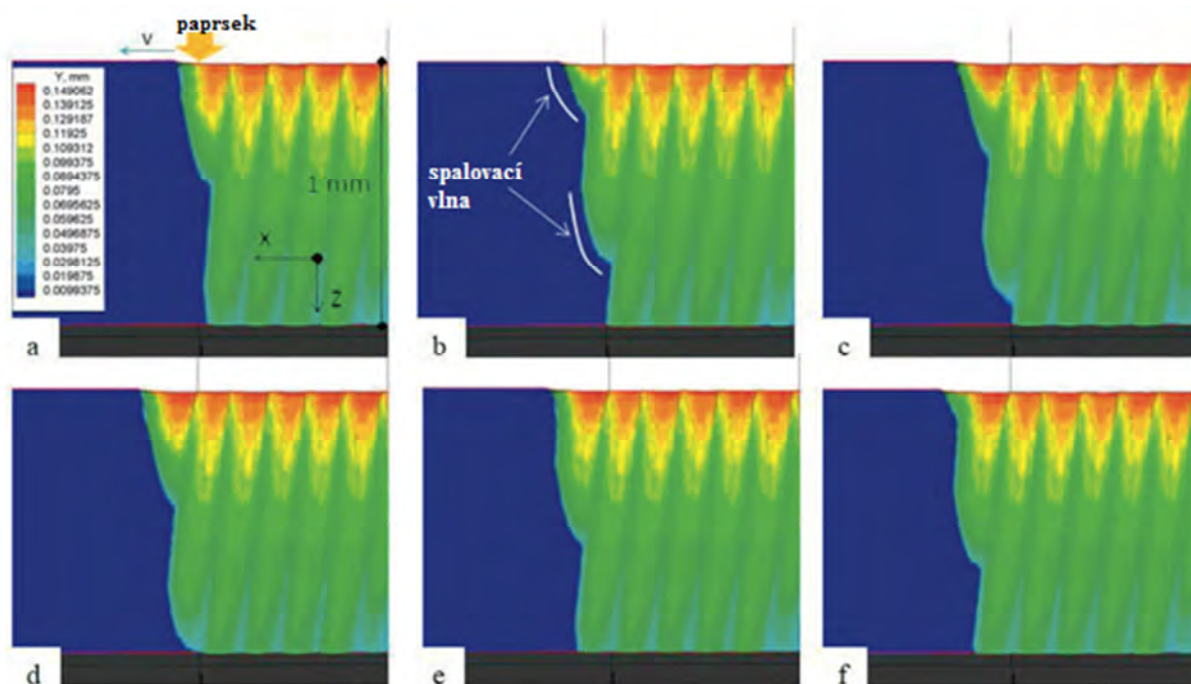
1/1



Příloha číslo 4 [46]

Závislost vnesené energie na jednotku objemu odebraného materiálu z řezné spáry

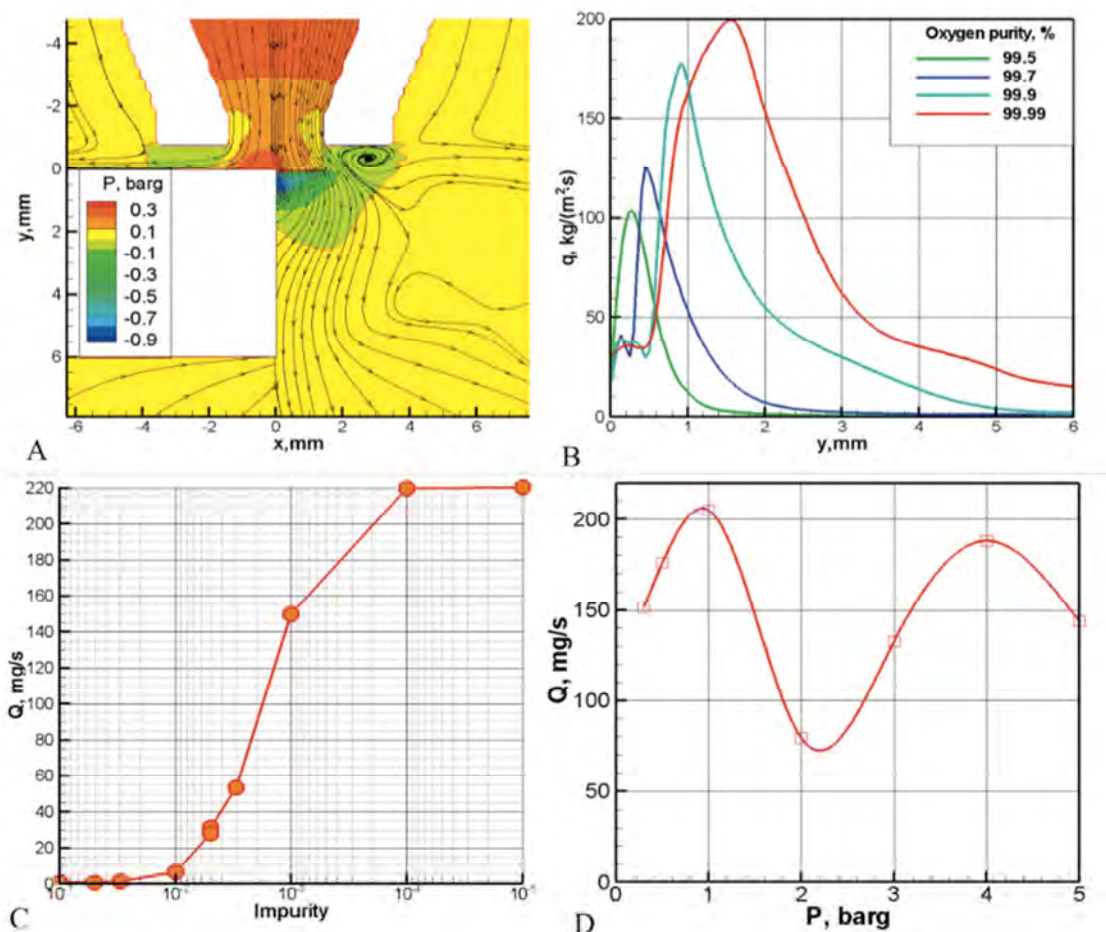




Dynamika tvorby řezné spáry [67]

Komentář:

Při počátku procesu se spalovací vlna pohybuje nejprve před paprskem v rovině horní plochy plechu, vlivem cyklickému spalování v určitém okamžiku dosáhne nezahřáté oblasti kovu. Radiální pohyb spalovací vlny se zpomalí a dokonce se zcela zastaví, viz obr. c). Ta část spalovací fronty, která směřuje do hloubky plechu, se stále pohybuje rovnoběžně s vrchní stranou řezu, kde je kov dobře zahřátý zářením. Na horním povrchu desky současně vzniká reakce, viz obr. d). Je možná současná existence dvou spalovacích vln. Snímek e) ukazuje, že první vlna se ještě nerozšířila do celé hloubky řezu, když se paprsek posunul a zahájil novou spalovací vlnu na povrchu. Cyklicita procesu způsobuje pravidelné utváření rýh, viz obr. f).



Numerické řešení problému [67]

Komentář:

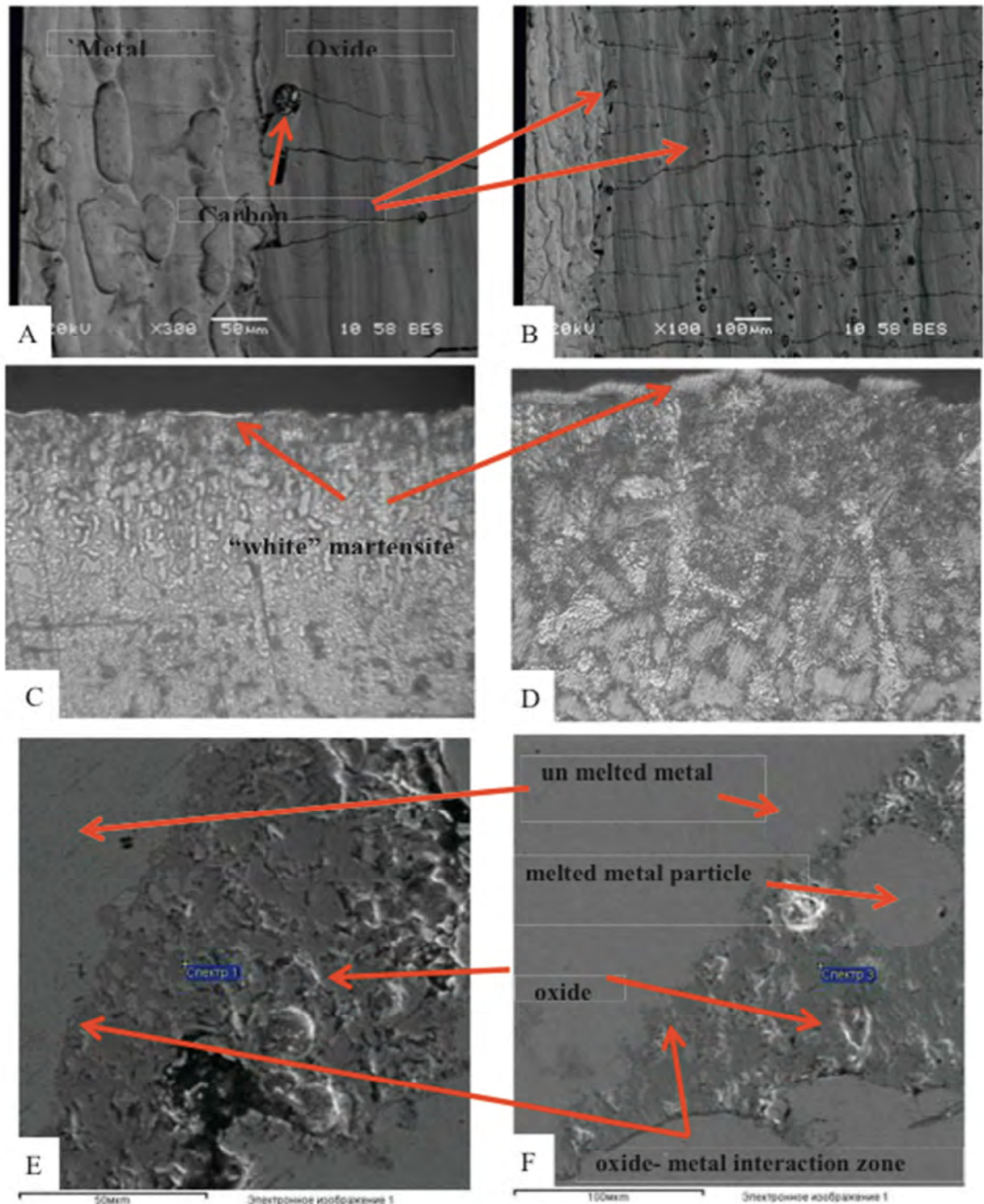
Část A, B obrázku ukazuje vzor toku plynu uvnitř řezu při vysoké čistotě kyslíku a rozložení intenzity reakce na přední stěně. Pokud je použit extrémně čistý kyslík (99,99% a více), tak jako v případě rozsahu od 99,5% do 99,9% čistoty kyslíku, vyskytuje se oblast nízkého tlaku plynu na přední části zářezu řezné spáry a jeho proud se otáčí směrem k povrchu. Inertní podvrstva uvnitř řezu je schopná zastavit proud směřující k povrchu. Rychlost toku kyslíku za oblastí nízkého tlaku, v hloubce 2 - 3mm, je omezena zvukovou bariérou 330 - 340 m/s. Jak je patrné z obrázku B, intenzita chemické reakce v tomto případě dosahuje 200 kg/m²s. Celková rychlost spotřeby kyslíku je 200 mg/s, charakteristický rozsah vrcholu intenzity chemické reakce je až 5 - 6 mm a intenzivní reakce pokračuje skrz celou tloušťku plechu.

Rychlost spotřeby kyslíku v řezné frontě ukazuje obr. C jako funkci čistoty kyslíku v logaritmické stupnici. Pokud je obsah nečistoty vyšší než 0,5 %, potom rychlost reakce určuje rozptyl kyslíku skrz inertní podvrstvu. Při ještě větší nečistotě rychlost reakce omezuje jak prostupnost inertní podvrstvy, tak dynamické efekty plynu. Jak je vidět na obr. A, B, spotřeba kyslíku v řezné frontě drasticky mění formu toku plynu v řezu a objevují se další specifické vlastnosti, které závisí na čistotě kyslíku. Když je čistota kyslíku vyšší než 99.99 %, pak je rychlost chemické reakce určována výhradně silami dynamiky plynu.

Obr. D ukazuje množství spotřebovaného kyslíku jako funkci tlaku v ústí trysky při čistotě kyslíku 99,9 %. V podzvukové oblasti toku, 0,1 - 0,89 baru, se rychlost spotřeby kyslíku plynule zvyšuje s narůstajícím tlakem. Transsonické efekty v tlakovém rozmezí 1 – 2 barů vedou k trojnásobnému snížení rychlosti reakce; další nárůst tlaku doprovází plynulý nárůst rychlosti reakce. Určité snížení rychlosti reakce při 5 barech je spojeno s přemístěním hranice spalovací vlny a také s druhým vrcholem intenzity reakce v řezu. Původní podmínky dynamiky plynu proto mají velký vliv na intenzitu reakce a celkovou rychlost spotřeby kyslíku v řezné frontě. To potvrzuje, že rychlost reakce je určována jak čistotou kyslíku, tak efekty dynamiky plynu uvnitř řezu.

Použití vysokých tlaků nevede k znatelnému nárůstu rychlosti reakce v porovnání s maximální úrovní dosaženou při nízkých tlacích. Objevují se pouze určité změny ve tvaru křivky intenzity reakce v hloubce zářezu.

Dále simulace spočítala potřebný výkon laseru 3,5 kW a intenzitu výkonu laserového paprsku v rozmezí $0,5 \cdot 10^9$ - 10^9 W/m², pro šířku řezné spáry řezání 0,5 mm. Simulace proběhla s běžně užívanou průmyslovou kvalitou. Pro užší řezné spáry v rozmezí od 0,3 do 0,4 mm může být potřebný výkon pro řezání v rozpětí 2 - 2,5 kW. Tyto hodnoty jsou velmi blízko úrovním energie a intenzity, které dosahují laserové zdroje. Tak je možno vysvětlit prakticky pozorovaný nárůst rychlosti řezání ve srovnání s řezáním za použití inertního plynu.



Obrázek: Metalurgické interakce při řezném procesu. A, B – SEM fotografie částic uhlíku zamrzlých ve vrstvě oxidu pokrývající povrch řezu. C, D – Vytváření vrstvy vysoce karbonizované ocele, „bílé“ martenzitové vrstvy na povrchu řezu. D, E – SEM fotografie vyčnívajících struskovitých hrudek, ilustrujících interakci pevného kovu s roztaveným oxidem.

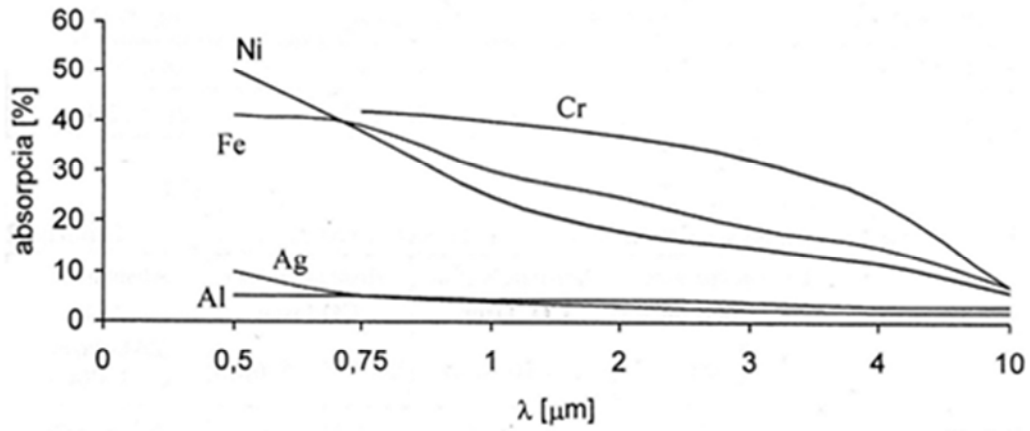
Komentář:

Obrázek představuje metalurgické interakce při řezném procesu, jejich snímky jsou pořízené SEM (Scan electron microscope). Sekce obr. A, B jsou fotografie částic uhlíku zamrzlých ve vrstvě oxidu pokrývající povrch řezu. Sekce obr. C, D ukazuje mikrosnímky řezné stěny a vytváření vrstvy vysoce karbonizované ocele, „bílé“ martenzitové vrstvy na povrchu řezu. Martenzitová vrstva může být 10 – 50 μm tlustá a závisí především na tloušťce plechu. Při řezání tlustých součástí byla tavena tuhá ocel od tekutého oxidu. Tato tavenina byla koncentrována ve vyčnívajících struskovitých hrudkách, jak ukazuje sekce obr. E, F. Drsný zoxidovaný okraj na E, F a odpadající zrnka kovu nekulovitého tvaru na obr. v sekci E ukazují, že tekutý oxid, který má bod tavení 1640 K může účinně rozpustit pevné železo, které má teplotu tavení 1810 K. Výsledkem tohoto procesu může být další poničení železa blízko řezné fronty a další zintenzivnění procesů hromadění a ohřívání v tavenině železa a oxidu.

Je zjevné, že interakce železa, kyslíku a uhlíku při procesu řezání je mnohem komplexnější, než tvorba oxidu železnatého tak, jak se většinou předpokládá. Jevy zobrazené na obr. v této příloze nejsou prostudovány dostatečně. Tyto jevy mohou být klíčovými body pro další rozvoj této technologie.

Příloha číslo 8 [7]

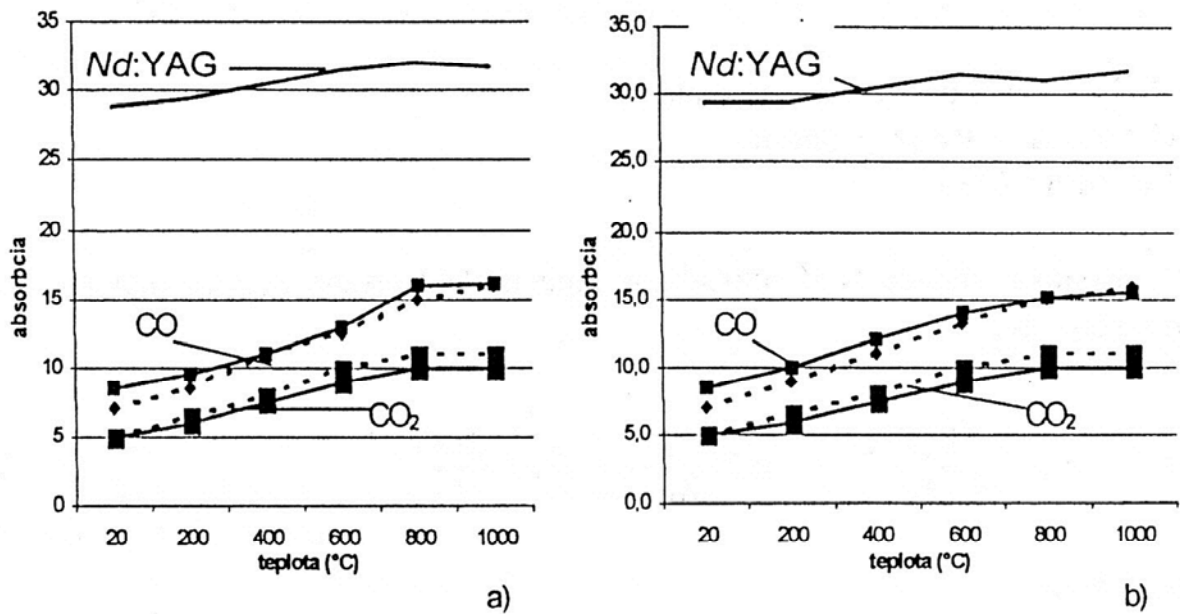
1/1



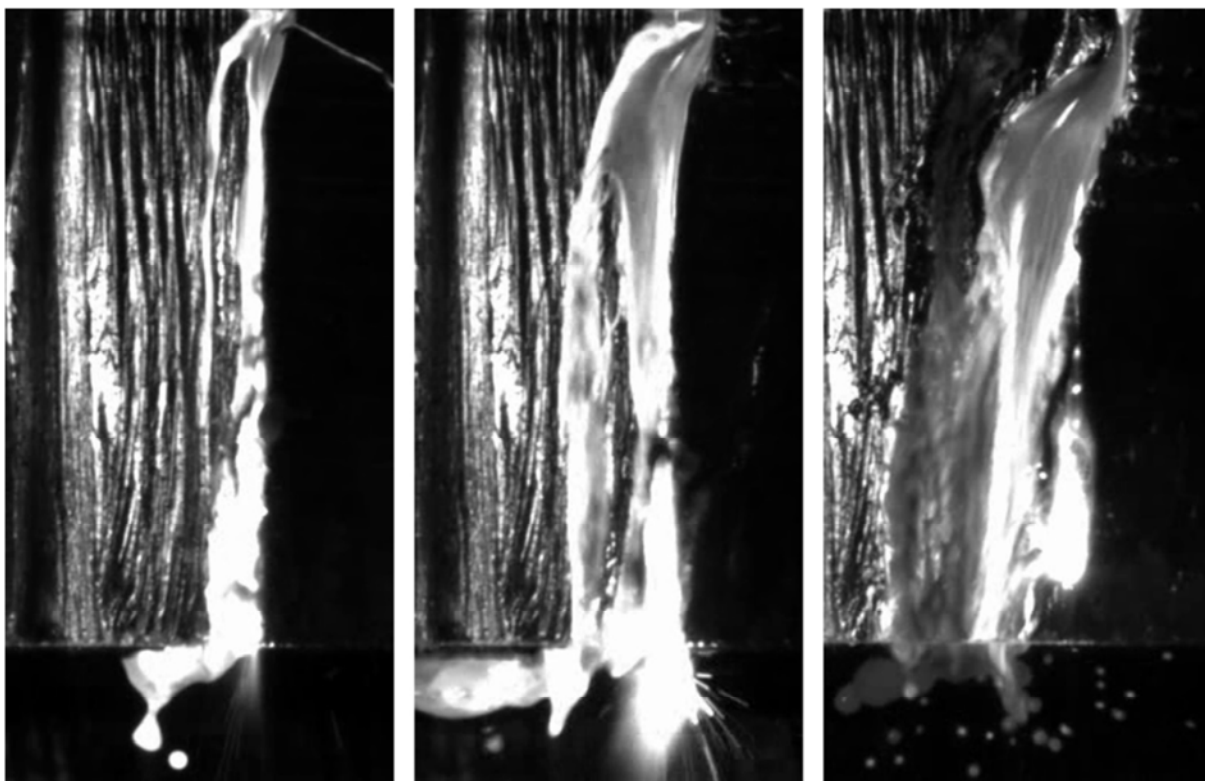
Porovnání absorpce různých materiálů v závislosti na vlnové délce záření [7]

Příloha číslo 9 [7]

1/1



Závislost absorpce na teplotě pro Nd: YAG laser a pro CO a CO₂ [7]

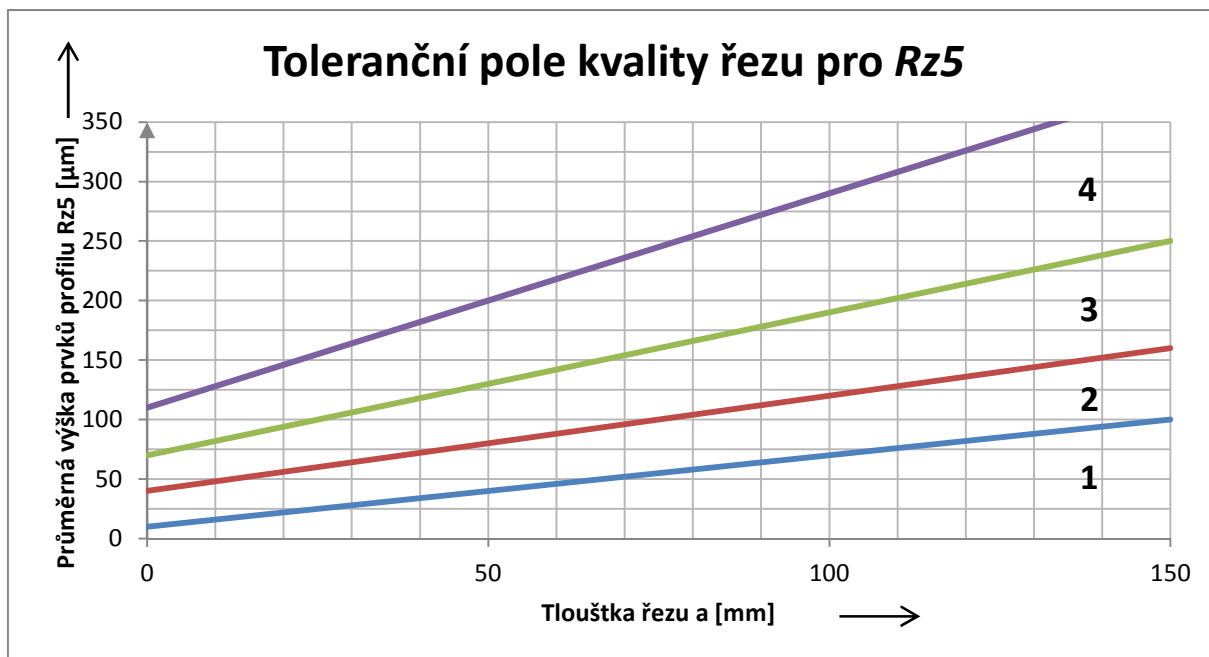


Mechanismus přechodu na samo udržitelný režim spalování. Laserové řezání 12 mm tlustého plechu nízkouhlíkové oceli vláknovým laserem o výkonu 2 kW. Řezná rychlost 600 mm/min. Interval mezi snímky 10 ms. Tlak kyslíku 0,7 baru, průměr trysky 2 mm, odstup 1 mm, ohnisko zaostřeno na vrchní povrch plechu.

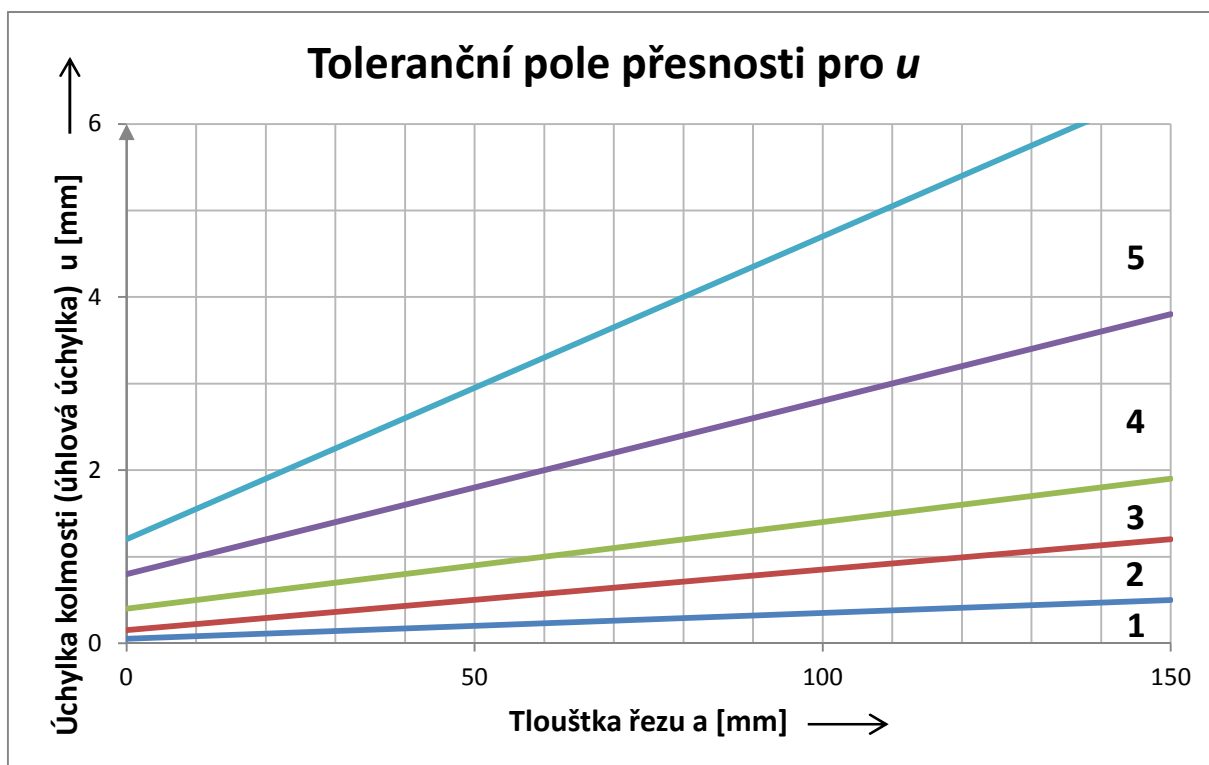
Komentář:

Dobře známá a nejdůležitější pro průmyslová vada tenkých nízkouhlíkových plechů je boční spalovací efekt. K tomu dochází, když je kov přehřátý, řezná rychlost je příliš nízká, laserový paprsek je rozostřen nebo asymetricky zaostřen. Uvolněná energie exotermickým spalováním je dostatečná k udržení teploty přední části řezu, která je vyšší než zapalovací teplota bez podpory laserového paprsku. Spalovací proces přechází do sebe udržitelného režimu. Vyhořelá oblast je v tomto případě omezená hranicemi kyslíkové trysky.

Stabilní režim řezání má poměrně dobrou kvalitou řezu, při přechodu na sebe udržitelné spalování (boční spalovací efekt) vykazuje řez špatnou kvalitou povrchu. Původní řezný proces byl doprovázen zapálením spalovacích vln. Hrb vytvářený vlnou v horní části řezné spáry způsobuje přesměrování proudu taveniny. Začátek přechodu byl spojen s občasným generováním druhého kanálu, kterým teče tavenina na boční ploše, viz první snímek zleva. Sekundární tok taveniny tekla dolů po předchozím vytvoření rýhy. Tato tvorba toku vedla k přehřátí v odpadové oblasti na stěně řezné spáry. Rozvinutý sebeudržující se režim představuje třetí snímek zleva. Řezná fronta je značně nakloněná. Ke spalování dochází na mnohem širší oblasti než při normálním řezání, bez omezení přítomnosti v laserovém záření. V případě sebe udržitelného módu závisí šířka řezné spáry na přítomnosti kyslíku v zóně reakce, proto je určována průměrem trysky.



Toleranční pole kvality pro Rz5 do tloušťky 150 mm [15]



Toleranční pole přesnosti pro u do tloušťky 150 mm [15]



Laserový řezací stroj BySprint a zakladač ByTrans [3]



Laserový řezací stroj BySprint při řezání [3]

Seznam zakázek
23-2 OCEL 2,5 S355J2C+N DOCENT

Řezné plány

Název řezného plánu	23-2-015	Plánovaný rozměr X	120,01 mm
Průběhy	1	Plánovaný rozměr Y	375,03 mm
Odpad	94,20%	Rozměr tabule X	1250,00 mm
Počet dílců	12	Rozměr tabule Y	399,00 mm
Řezný čas	00:01:18	Vedlejší časy	00:01:10
		Čas celkem	00:02:29



Čís.	Název dílce	Rozměr X	Rozměr Y	Hmotnost	Řezný čas	Počet
1	Test-diplomka-O-N	50,00 mm	50,00 mm	0,047 kg	00:00:07	12

ALFUN



Dodavatel:

ALFUN a.s.
Zahradní 1610/40
79201 BRUNTÁL

IČ: 25828649 DIČ: CZ25828649
Společnost zapsaná v OR KS Ostrava, oddíl B, vložka 2732

Kontaktní osoba odběratele:

Soukop Michal
FAX: +420 545 220 056-051

ATEST dle EN 10204; 2.2

Číslo atestu : 220112808
Interní kód atestu : AT14105449
Zákazník : **AQUAdem, s.r.o. (Tovární 739/1 Brno-Chrlice, 643 00)**
Číslo objednávky : OV14-1976
Číslo dodacího listu : DL141020470
Zhotovil : Truchlíková Markéta Dne : 7.7.2014

Atest: AT14105449/220112808 (AT14105449)

Opis atestu (Transcript of inspection cert.)

Tavba (Heat No.) Datum zhotovení (Date)

147923 23.05.2014

Obsažené prvky (Contained elements)

C	Mn	Si	P	Al	
0,168	1,430	0,012	0,013	0,034	
S	N	Nb	Ti	Cu	V
0,005				0,027	0,001

Mechanické hodnoty (Mechanical properties)

Rm [MPa]	ReH [MPa]	A	A80
579,000	434,000	0,000	17,000

Vlastnosti materiálu dle EN 10025-2, EN 10051, EN 10268, EN 10131,, EN 10130, EN 10131,, EN 10111, EN 10051

Charakteristika materiálu

Označení chemického složení, stav, rozměry [mm]

S355J2C+N 2.5x1250x2520 mořený

Popis materiálu: tol. šířky: +/- 1 mm tol. délky: +/-1,5 mm materiál bude odebírán na jednotlivé odvolánky

Za správnost údajů odpovídá:	Truchlíková Markéta	Podpis ALFUN ALFUN A.S. ZAHRADNÍ 1610/40 792 01 BRUNTÁL, CZ IČ: 25828649
------------------------------	---------------------	---

Příloha číslo 16 [1]

1/1



Drsnoměr MarSurf M300 (vlevo) s posuvovou jednotkou MarSurf RD 18 (vpravo) [1]



Drsnoměr MarSurf M300

Identifikační údaje drsnoměru [1]

Označení drsnoměru:	MarSurf M300
Výrobce:	Mahr GmbH – Göttingen
Označení na štítku přístroje:	TAMB2300 Contains FCC – IDR7TAMB2300
Výrobní číslo	6910402.
Označení posuvné jednotky:	MarSurf RD 18
Označení na štítku přístroje:	Contains FCC – ID R7TAMB2300
Výrobní číslo:	6910403



Povrch 01 vzorku u tavného řezání



Povrch 02 vzorku u tavného řezání



Povrch 03 vzorku u tavného řezání



Povrch 04 vzorku u tavného řezání



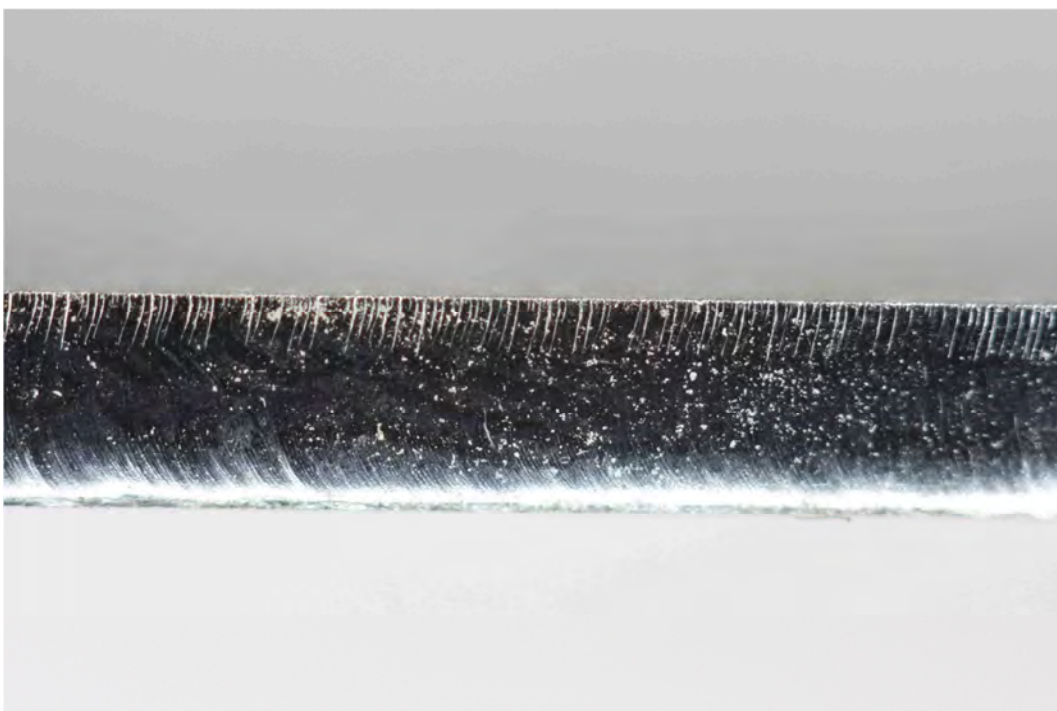
Povrch 01 vzorku u oxidačního řezání



Povrch 02 vzorku u oxidačního řezání



Povrch 03 vzorku u oxidačního řezání



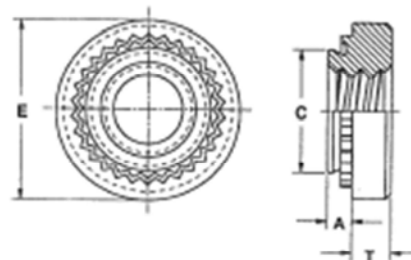
Povrch 04 vzorku u oxidačního řezání

Lisovací matice

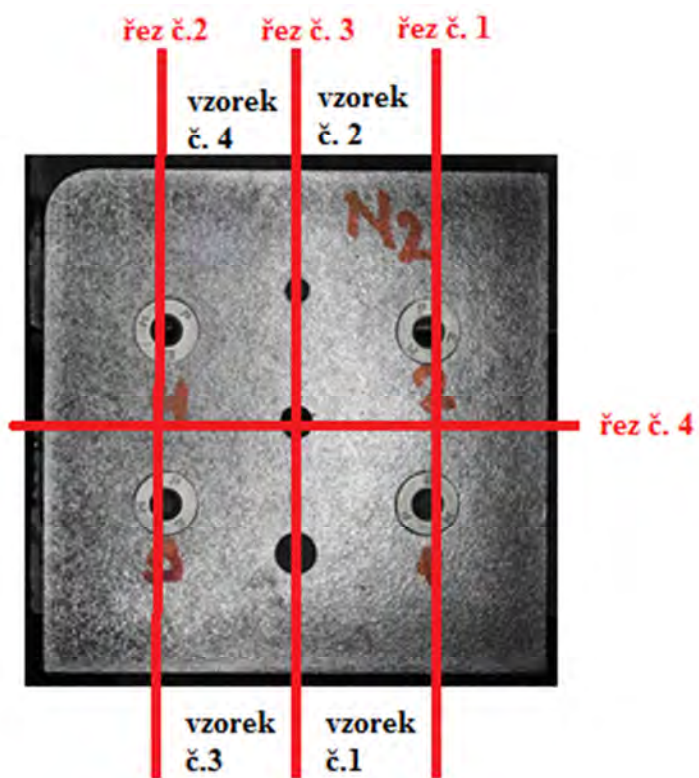
**Typ S, SS
CLS, CLSS**

Základní typy lisovacích matic pro široké spektrum použití.

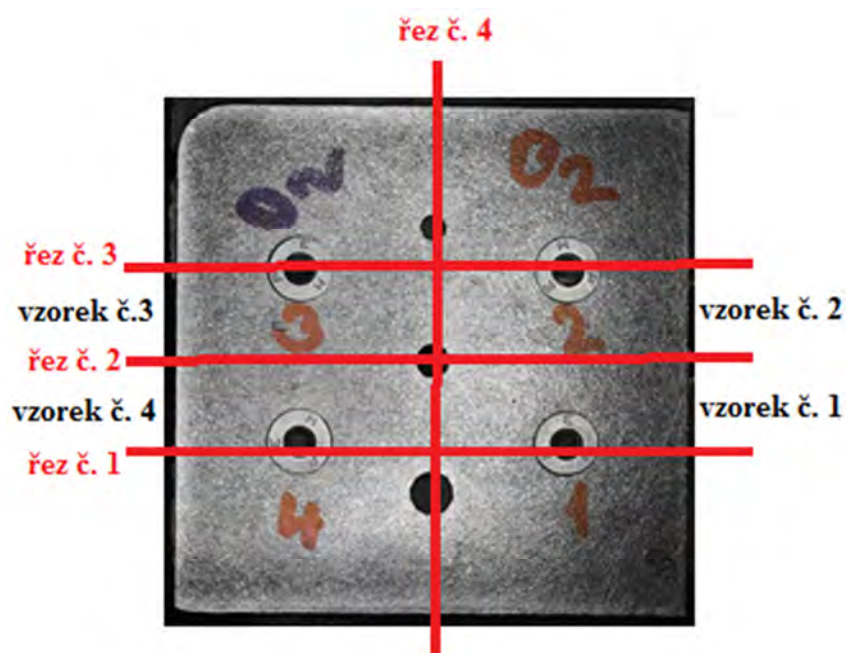
Materiál:
ocel (pozinkovaná)
nerez. ocel
Al-slitina



Závít	Typ		Kód závítu	Kód dířku	A max.	Min. tlouřka plechu	Ø dířky v plechu + 0.08	C max.	E ± 0,25	T ± 0,25	Min. vzdál. osy od okraje
	ocel	Nerez. ocel									
M2 X 0.4	S	CLS ⁰¹	M2	0	0.76	0.8-1	4.25	4.22	6.3	1.5	4.8
				1	0.97	1					
				2	1.37	1.4					
M2.5 X 0.45	S	CLS	M2.5	0	0.76	0.8-1	4.25	4.22	6.3	1.5	4.8
				1	0.97	1					
				2	1.37	1.4					
M3 X 0.5	S	CLS	M3	0	0.76	0.8-1	4.25	4.22	6.3	1.5	4.8
				1	0.97	1					
				2	1.37	1.4					
M3.5 X 0.6	S	CLS	M3.5	0	0.76	0.8-1	4.75	4.73	7.1	1.5	5.6
				1	0.97	1					
				2	1.37	1.4					
M4 X 0.7	S	CLS	M4	0	0.76	0.8-1	5.4	5.38	7.9	2	6.9
				1	0.97	1					
				2	1.37	1.4					
M5 X 0.8	SS	CLSS	M5	0	0.76	0.8-1	6.4	6.38	8.7	2	7.1
				1	0.97	1					
				2	1.37	1.4					
M6 X 1	S	CLS	M6	0 ⁰¹	1.15	1.2	8.75	8.72	11.05	4.08	8.6
				1	1.37	1.4					
				2	2.21	2.3					
M8 X 1.25	S	CLS ⁰¹	M8	1	1.37	1.4	10.5	10.47	12.65	5.47	9.7
				2	2.21	2.3					
M10 X 1.5	S	CLS	M10 ⁰¹	1	2.21	2.31	14	13.97	17.35	7.48	13.5
				2	3.05	3.18					



Postup při dělení zalisovaného vzorku N₂ (tavný způsob)



Postup při dělení zalisovaného vzorku O₂ (oxidační způsob)



Pila Micron 110 (čelní pohled)



Pila Micron 110 (boční pohled)



Dělení zalisovaného vzorku O₂



01 Dělení zalisovaného vzorku N₂



02 Dělení zalisovaného vzorku N₂



Metalografický lis CitoPress - 1



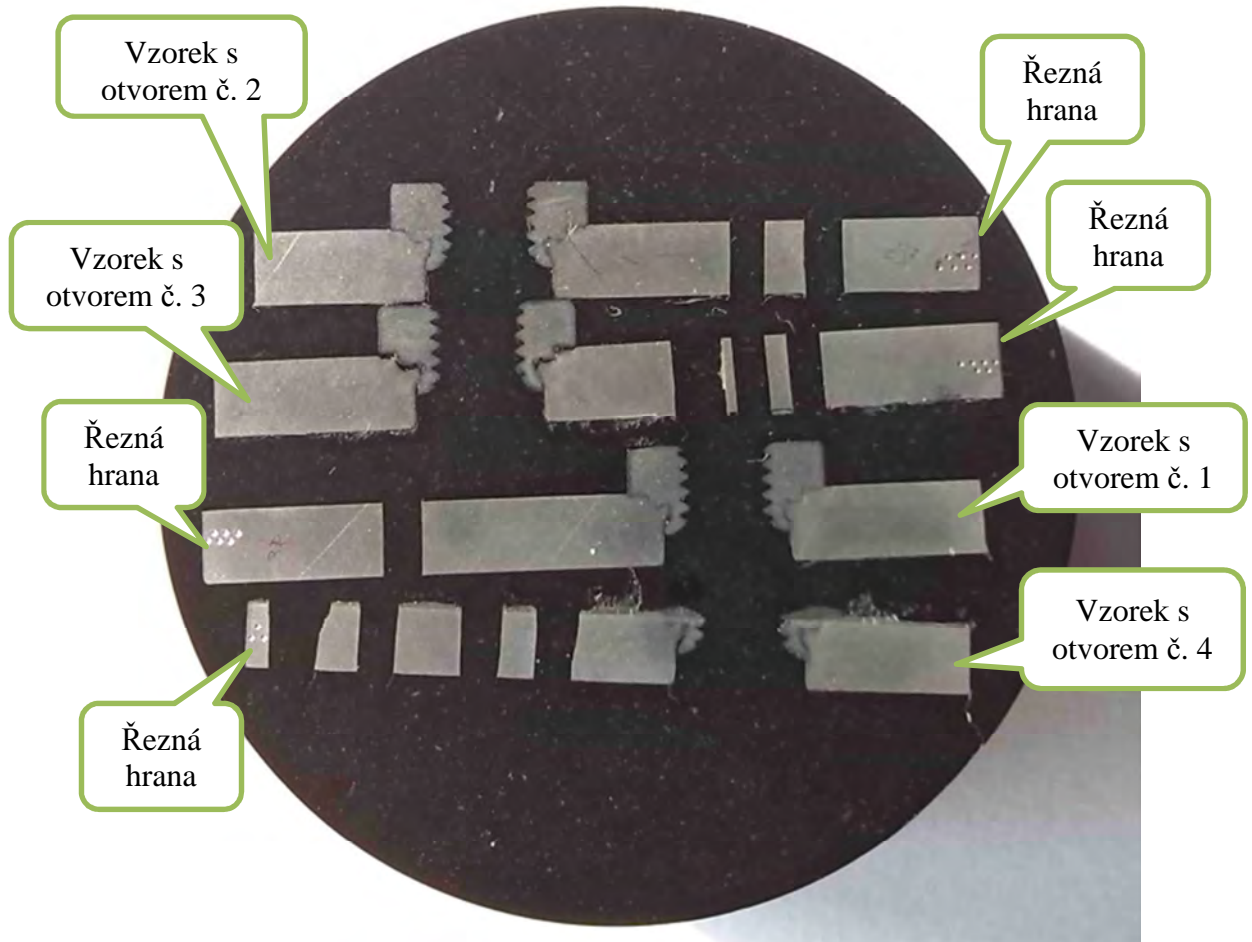
Vzorky v lisovací komoře připravené na zalití



Metalografický lis (vpředu); zařízení pro broušení vzorků (vzadu)



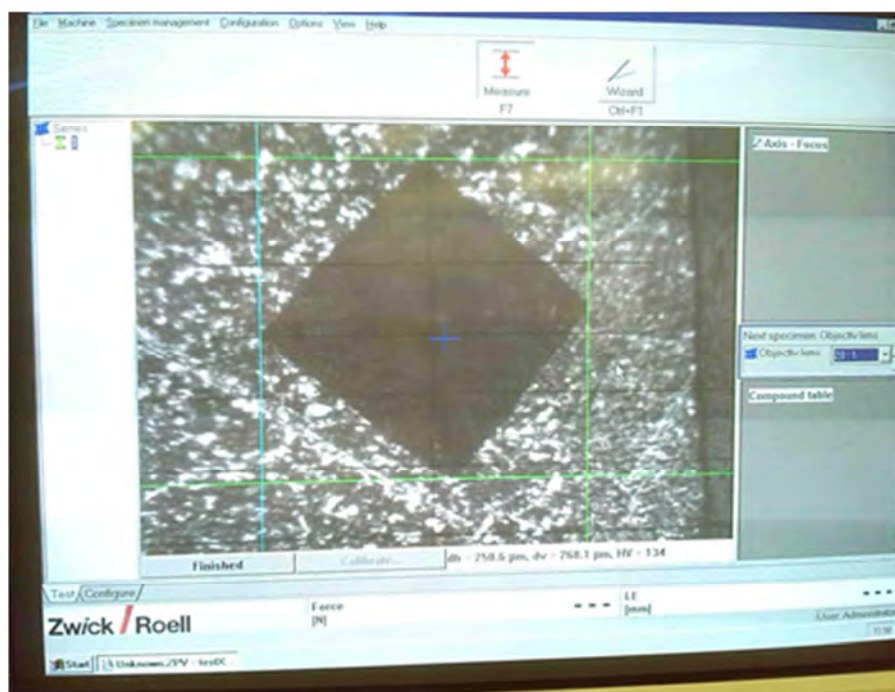
Metalografické zařízení Struers Tegamin – 20



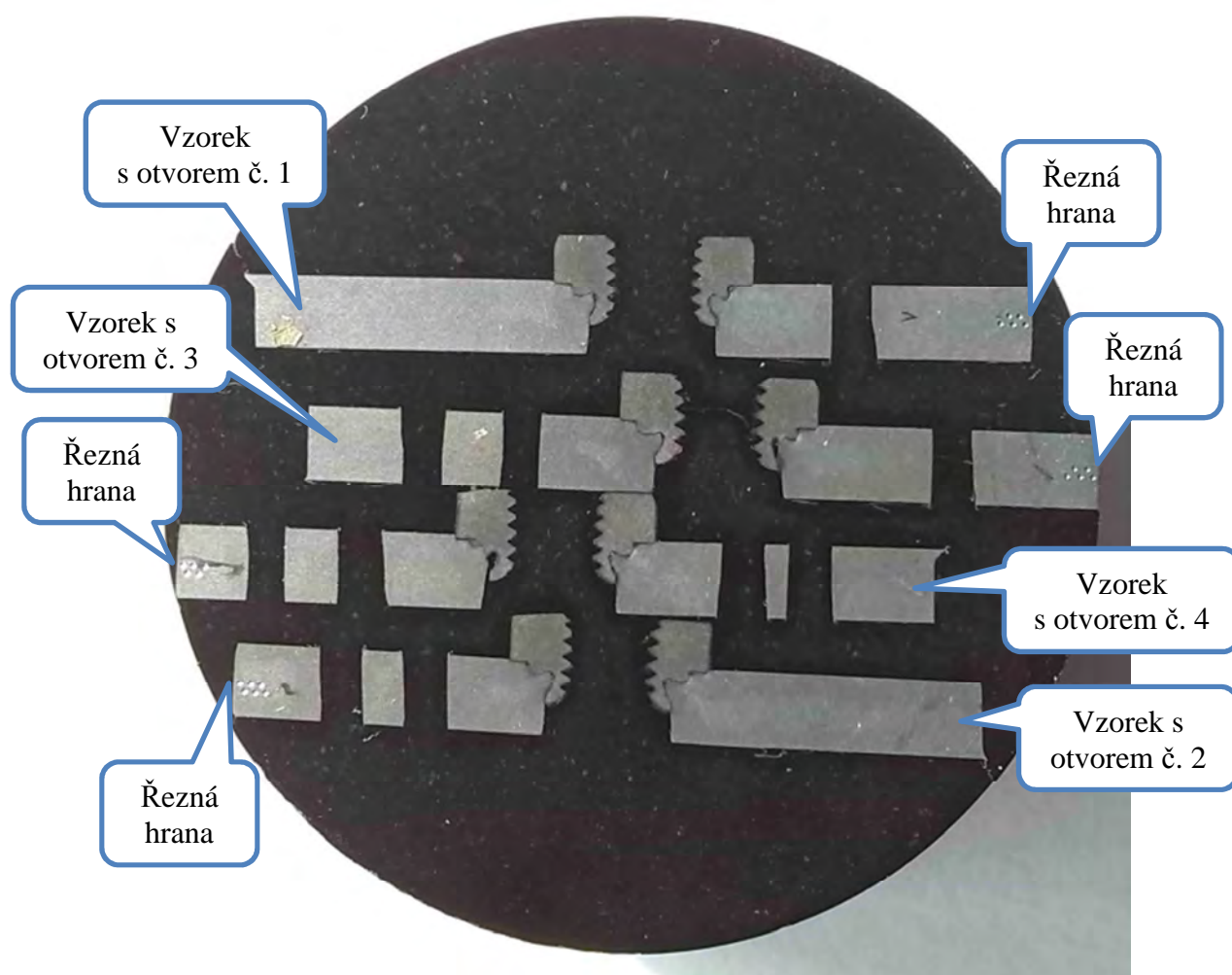
Metalografický vzorek N₂



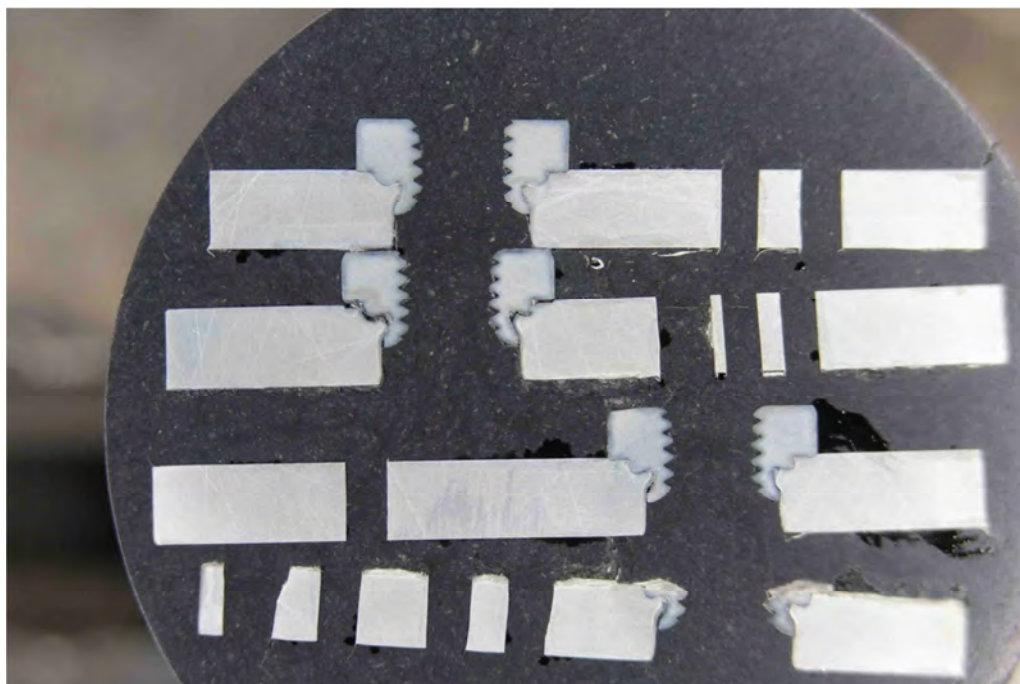
Tvrdoměr Zwick 3212 s kompletním příslušenstvím



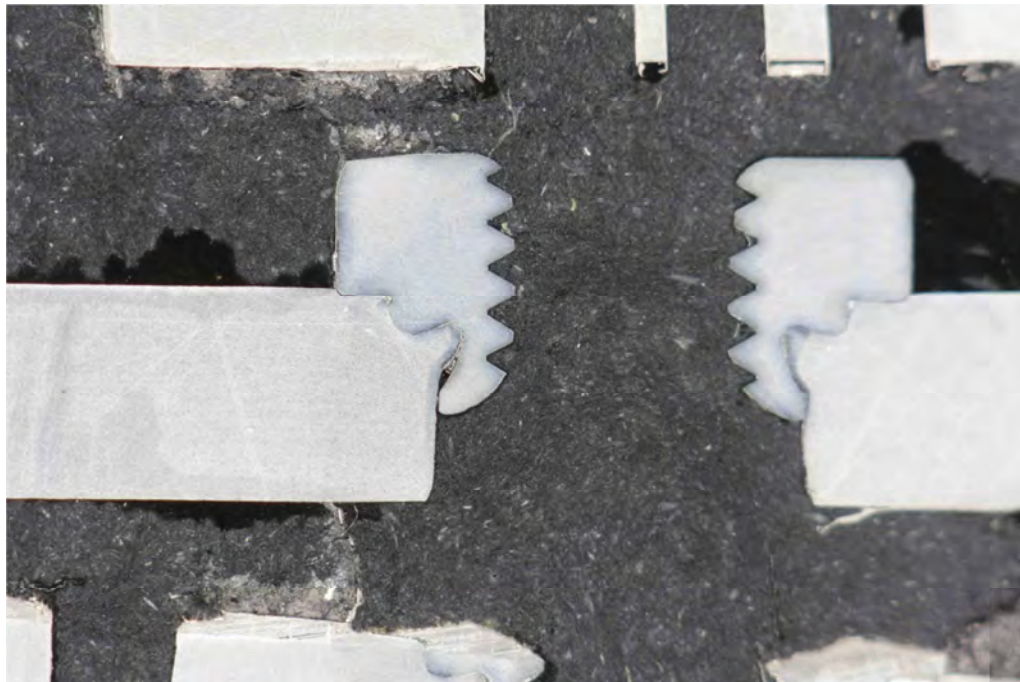
Vtisk ve vzdálenosti 0,2 mm od řezné hrany - snímán CCD kamerou tvrdoměru



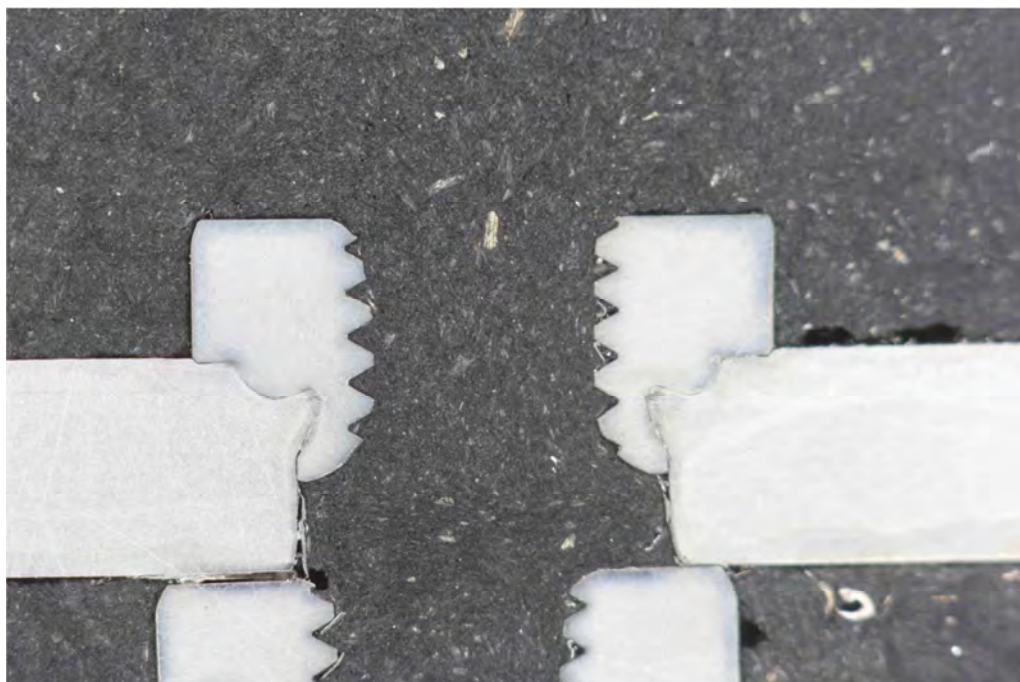
Metalografický vzorek O₂



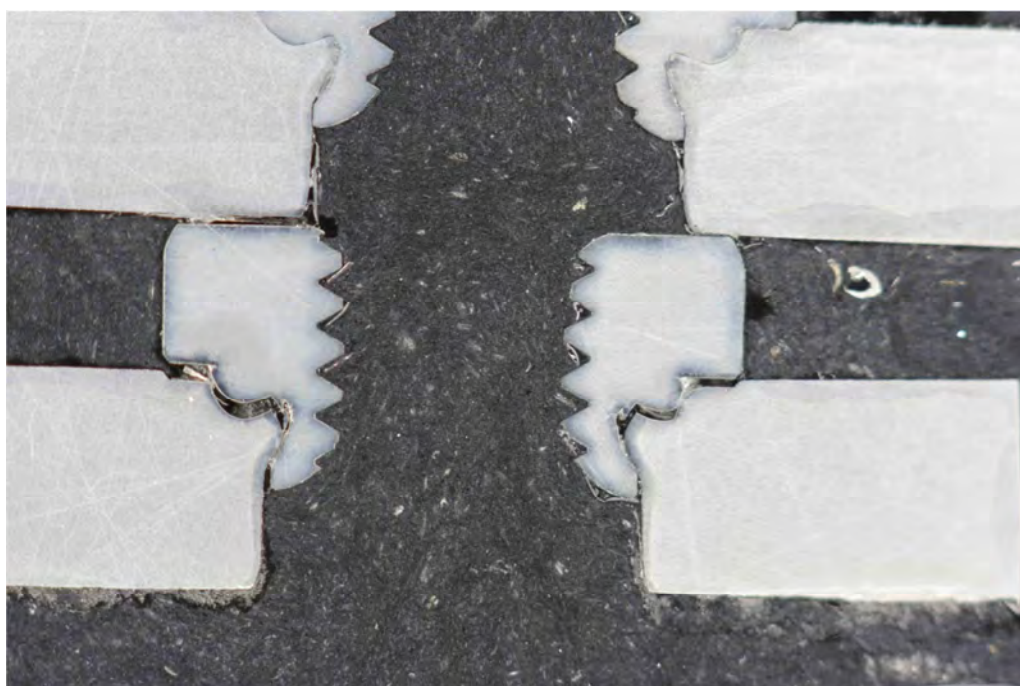
Makro - metalografický vzorek N₂



Makro - vzorek č. 1 N₂ – výchozí otvor 4,36 mm



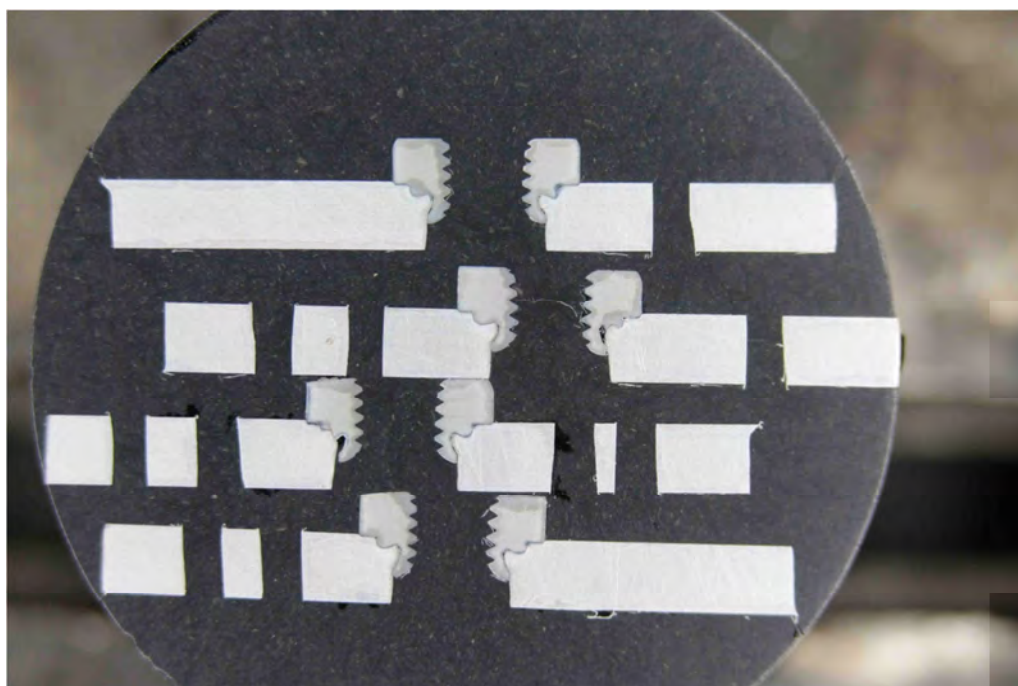
Makro - vzorek č. 2 N₂ – výchozí otvor 4,34 mm



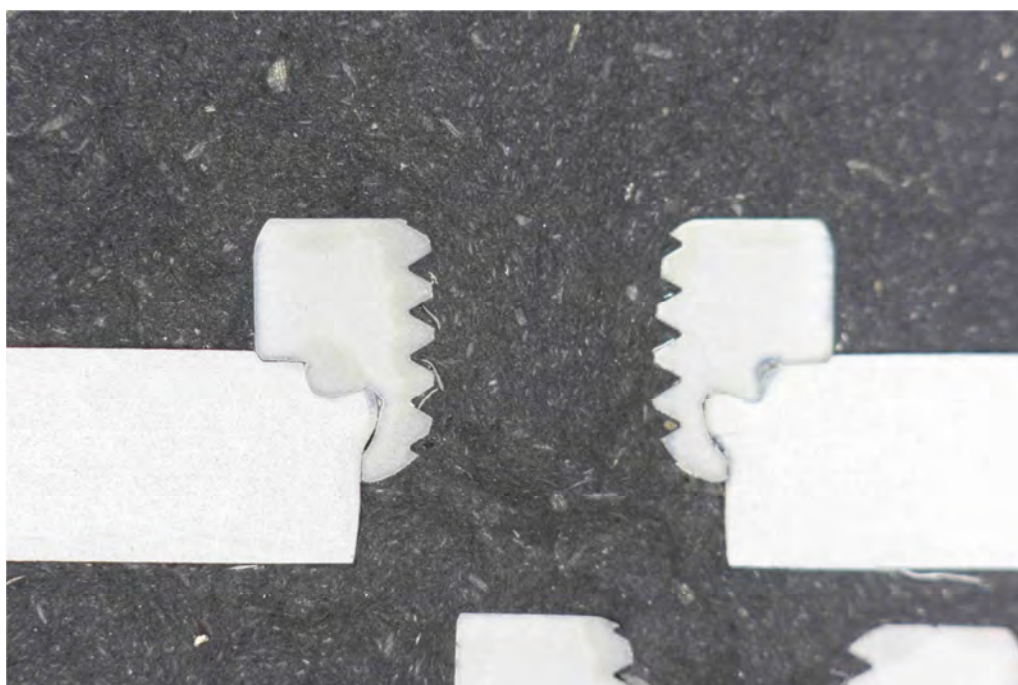
Makro - vzorek č. 3 N₂ – výchozí otvor 4,30 mm



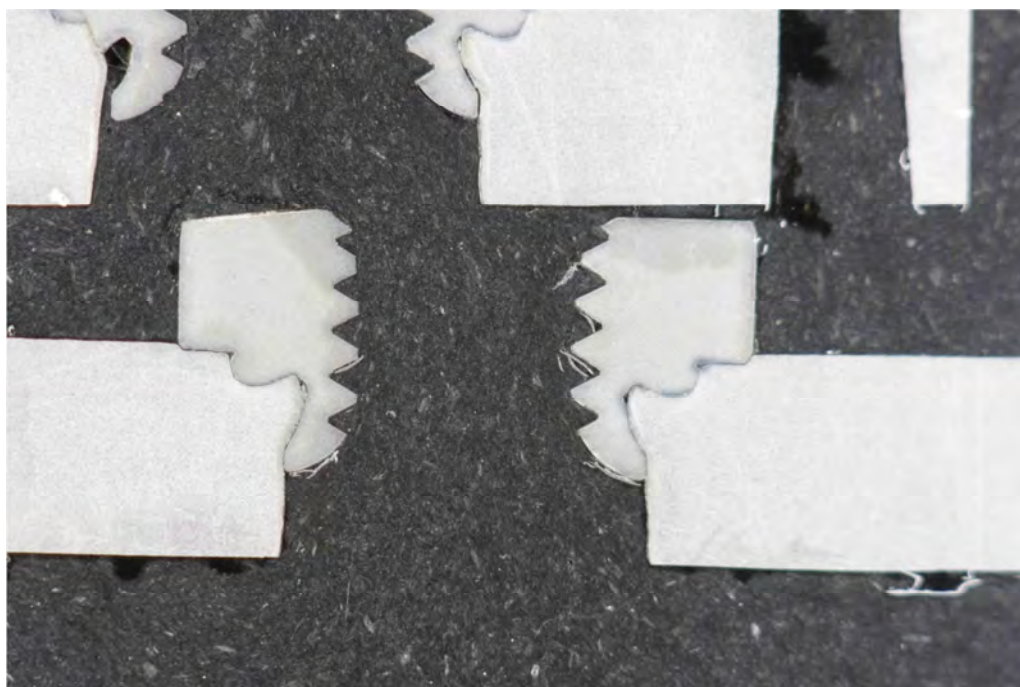
Makro - vzorek č. 4 N₂ – výchozí otvor 4,24 mm



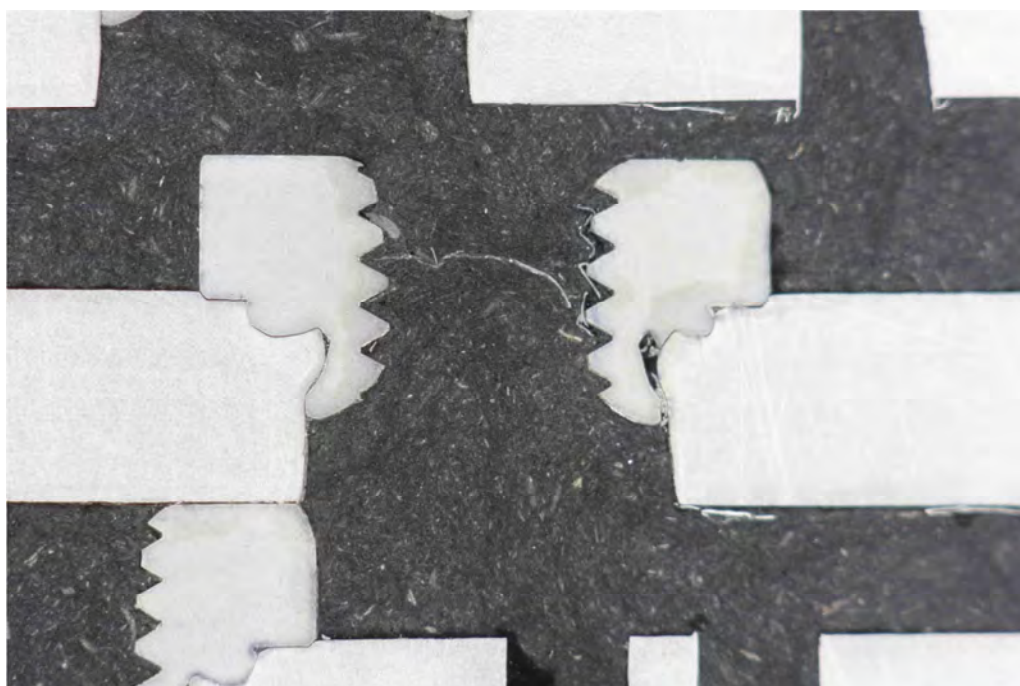
Makro - metalografický vzorek O₂



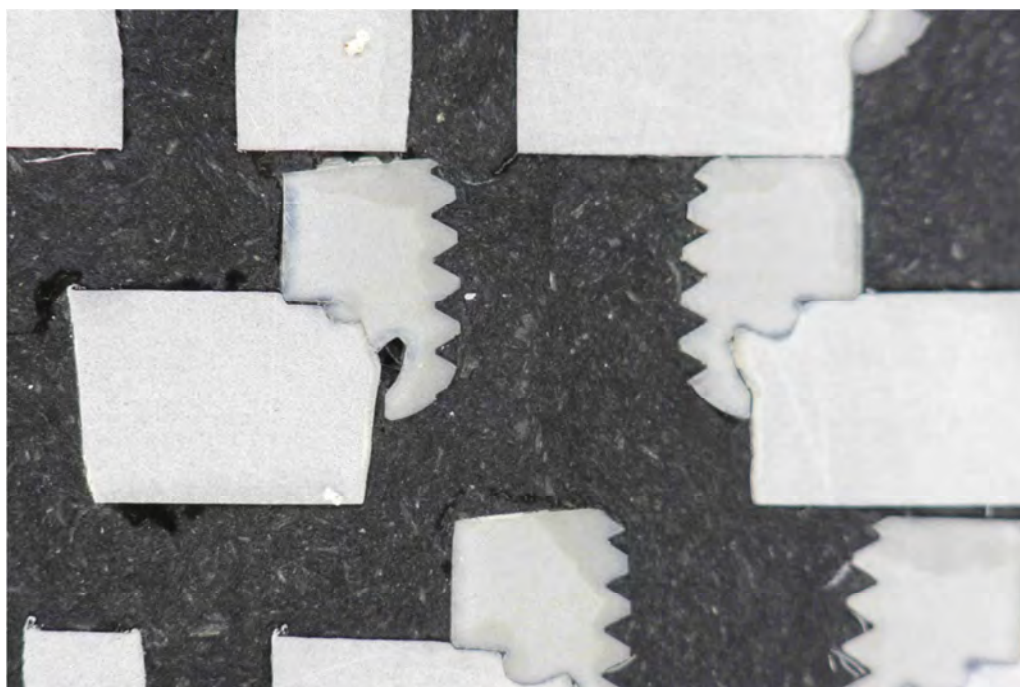
Makro - vzorek č. 1 O₂ – výchozí otvor 4,36 mm



Makro - vzorek č. 2 O₂ – výchozí otvor 4,34 mm



Makro - vzorek č. 3 O₂ – výchozí otvor 4,24 mm

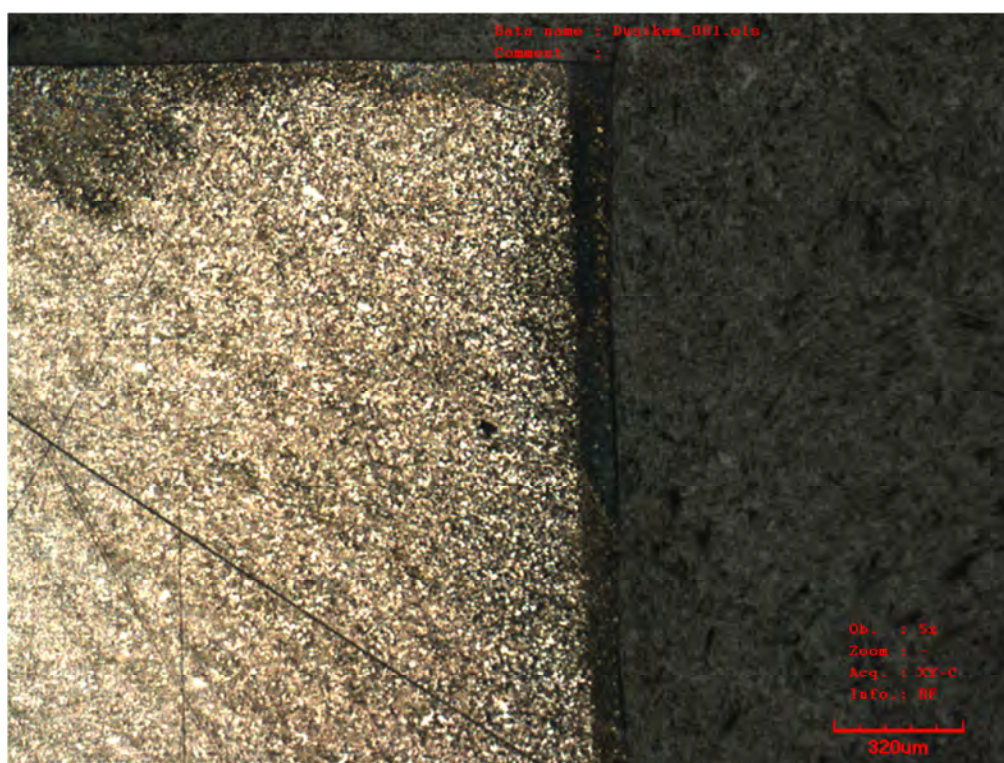


Makro - vzorek č. 4 O₂ – výchozí otvor 4,30 mm

Příloha číslo 28

Snímky pořízené na laserovém mikroskopu N₂

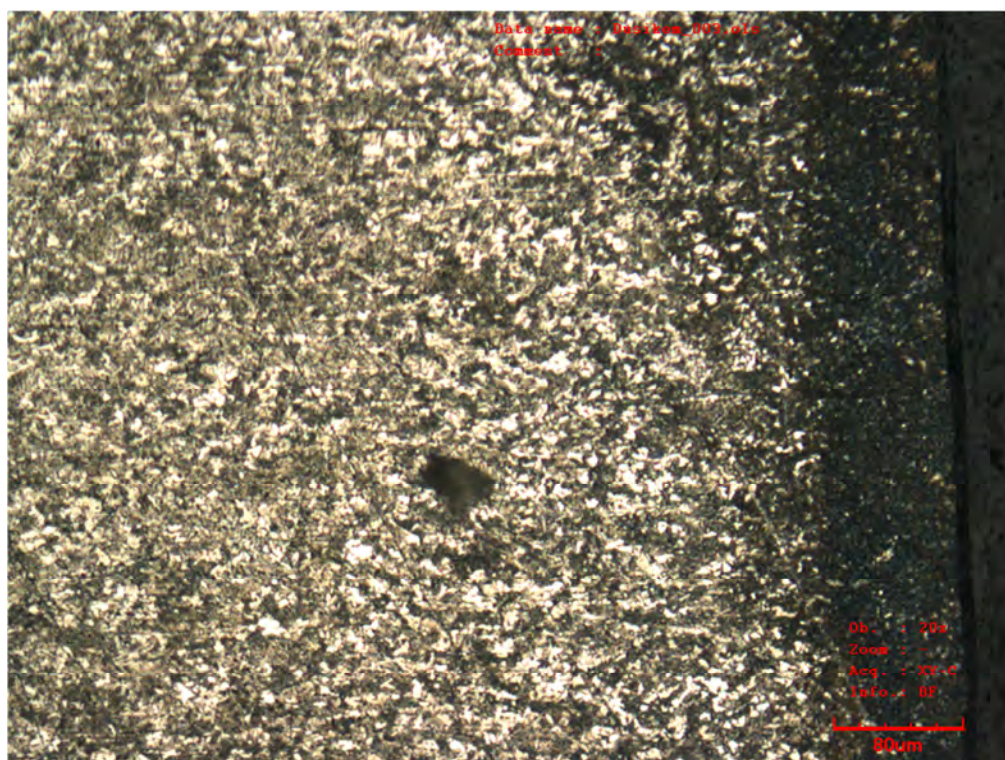
1/3



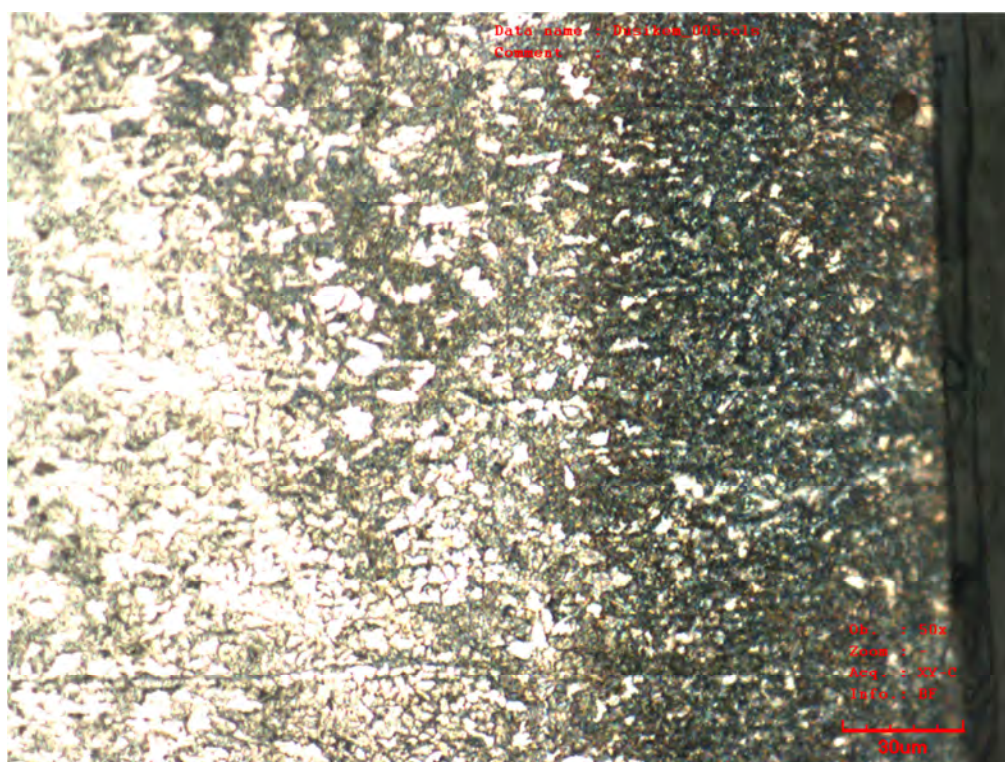
Řezná hrana na metalografickém vzorku N₂ – zvětšení 5x



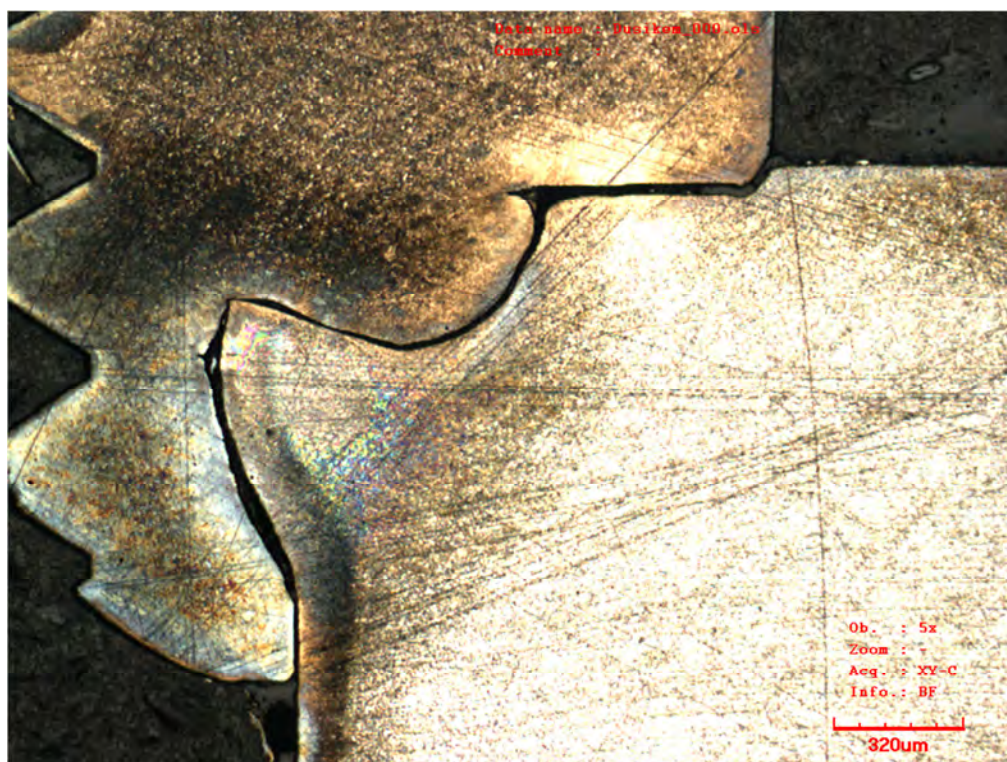
Řezná hrana na metalografickém vzorku N₂ – zvětšení 10x



Řezná hrana na metalografickém vzorku N₂ – zvětšení 20 x



Řezná hrana na metalografickém vzorku N₂ – zvětšení 50 x

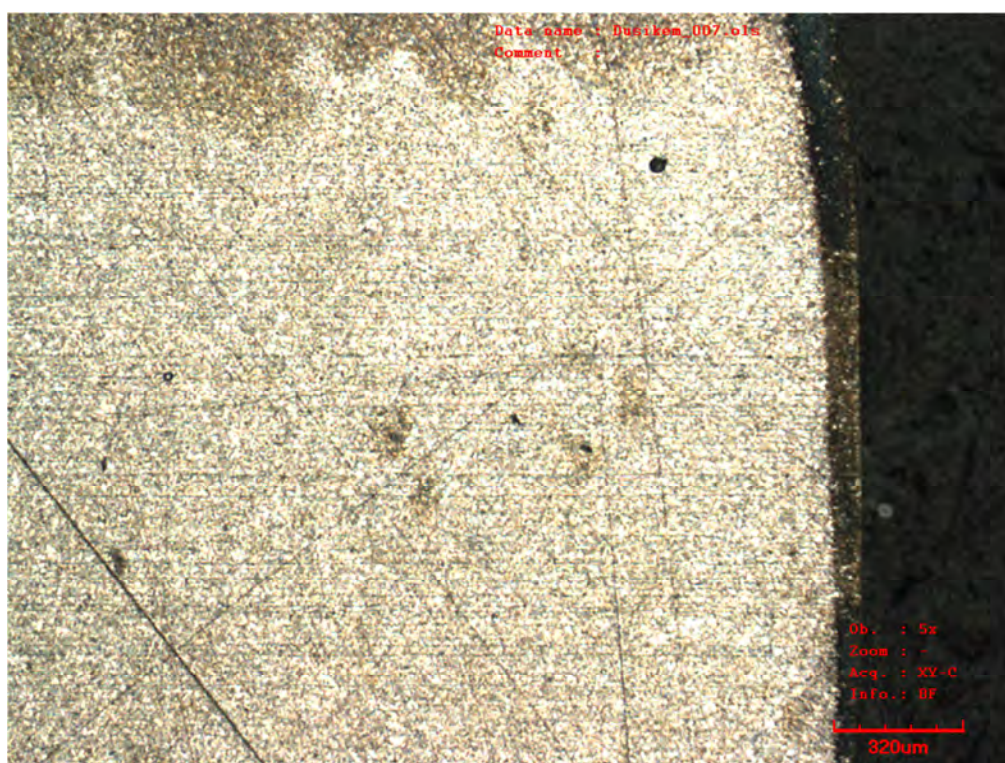


Snímek zalisované matice u metalografického vzorku N₂ – zvětšení 50x

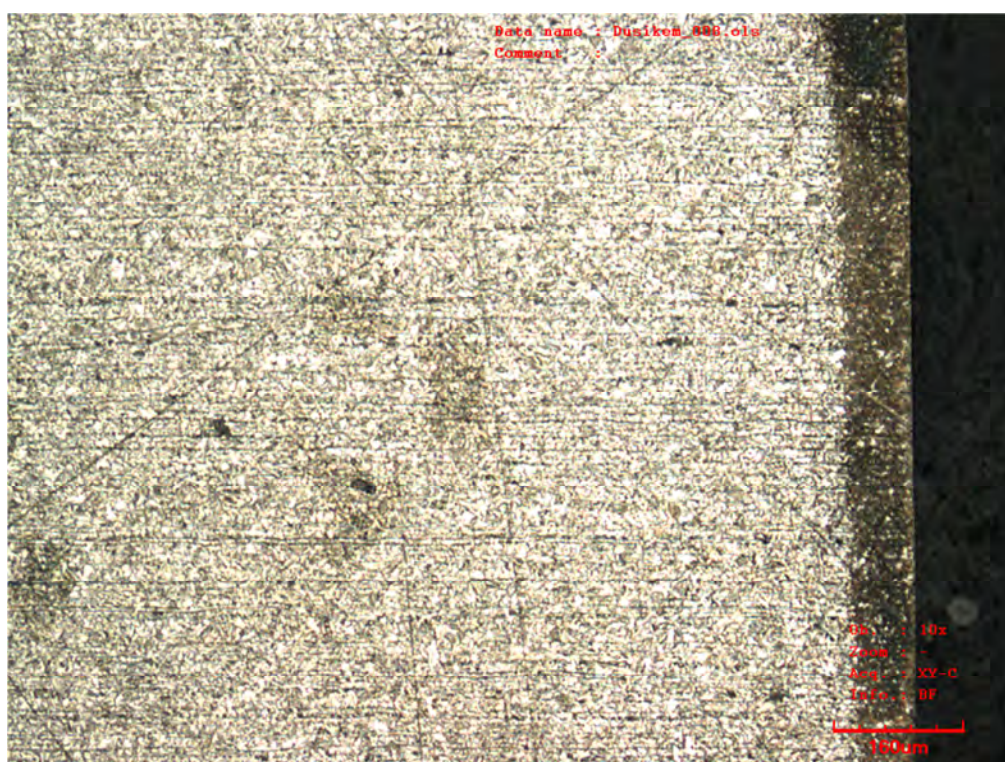
Příloha číslo 29

Snímky pořízené na laserovém mikroskopu O₂

1/3



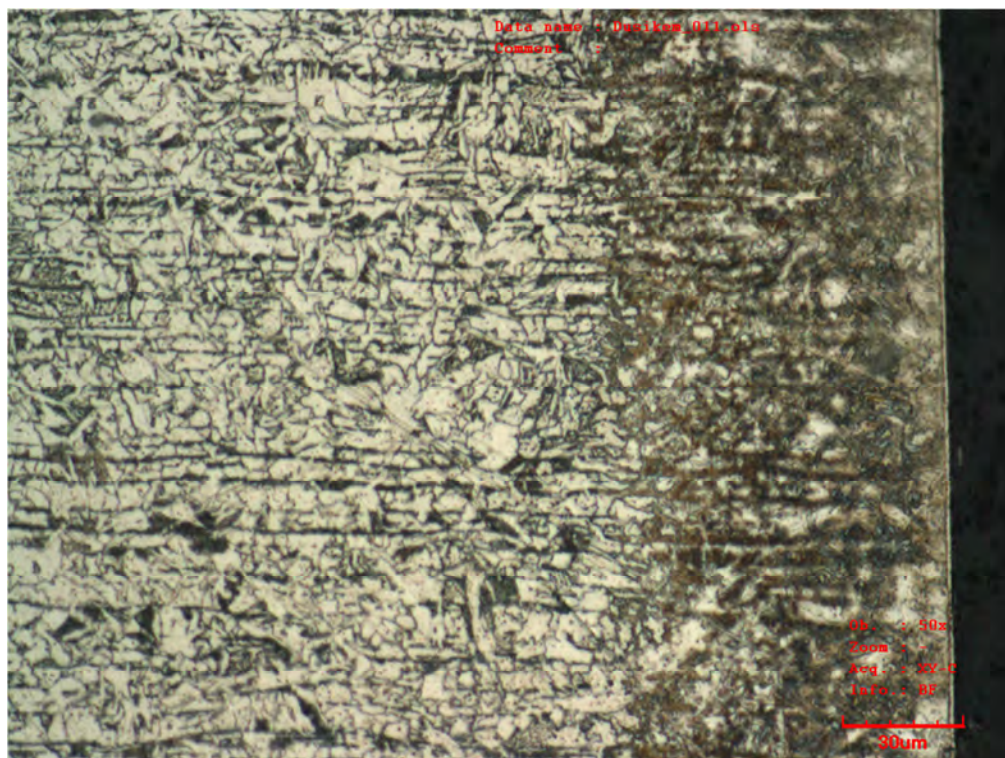
Řezná hrana na metalografickém vzorku O₂ – zvětšení 5 x



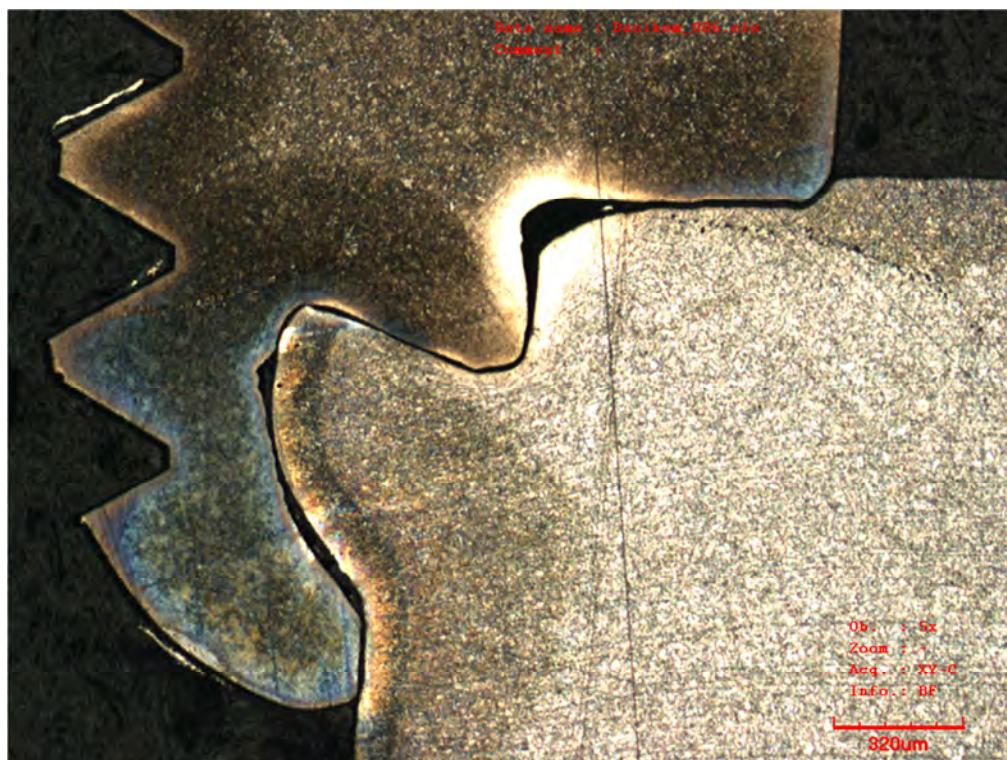
Řezná hrana na metalografickém vzorku O₂ – zvětšení 10 x



Řezná hrana na metalografickém vzorku O₂ – zvětšení 20 x



Řezná hrana na metalografickém vzorku O₂ – zvětšení 50 x



Snímky zalisované matice u metalografického vzorku O₂ – zväčšenie 50x

STROJNÍ ZÁVITNÍKY
Machine taps / Maschinengewindebohrer



Skupina obráběného materiálu
Material group / Werkstoffgruppe

1.2; 2.2; 8.1; 1.1; 2.1; 2.3; 6.2; 8.2; 10.1



1500

1.1; 1.2; 2.1; 2.2; 2.3; 6.2; 8.1; 8.2; 10.1



1510

1.2; 2.2; 8.1; 11.1; 2.3; 8.2



1540

1.1; 1.2; 2.1; 2.2; 2.3; 8.1; 8.2



1750

Katalogové číslo / Cat. No. / Kat. Nr.								1500	1500	1510	1540	1750
<p>z = počet drážek / z = number of flutes / z = Nutenzahl</p>								<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">TiN</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">OX</div> </div>				
								<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">ISO 3 6G</div>				
d ₁	P	l ₁	l ₂	d ₂	a	z	Ø mm					
M 2	0,4	45	8	2,8	2,1	3	1,6	■		■		
M 2,5	0,45	50	9	2,8	2,1	3	2,05	■		■		
M 3	0,5	56	9	3,5	2,7	3	2,5	■	■	■		■
M 3,5	0,6	56	11	4	3	3	2,9	■	■	■		■
M 4	0,7	63	12	4,5	3,4	3	3,3	■	■	■		■
M 4,5	0,75	70	13	6	4,9	3	3,7	■	■	■		■
M 5	0,8	70	13	6	4,9	3	4,2	■	■	■		■
M 6	1	80	15	6	4,9	3	5	■	■	■		■
M 7	1	80	15	7	5,5	3	6	■	■	■		■
M 8	1,25	90	18	8	6,2	3	6,8	■	■	■		■
M 9	1,25	90	18	9	7	3	7,8	■	■	■		■
M 10	1,5	100	20	10	8	3	8,5	■	■	■		■

■ dodáváme standardně / standard supplies / Standardlieferbar

X.X Doporučené užití / Recommended use / Optimal
X.X Možno použít / Possible use / Geeignet



Měřicí aparatura pro měření řezných momentů a sil



Příprava na měření řezných momentů



Vrtačka Tos V20