



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ŘEZÁNÍ LASEREM

LASER CUTTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Baran

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Marek Baran**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubiček**
Akademický rok: 2016/17

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

Řezání laserem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Laserové technologie mají výrazně rostoucí aplikační možnosti. Řezání patří mezi tradiční a dlouho používané technologie. Současné výkonové lasery řezou do tloušťky 35 mm. Práce je zaměřena na optimalizaci polohy ohniska při řezání tloušťky až 20 mm.

Cíle bakalářské práce:

1. Zhodnotit současný stav tepelného dělení tlustých plechů.
2. Vypracovat literární studii principu laserových technologií.
3. Vyhodnotit důležité parametry a podmínky procesu, které mají vliv na řezatelnost.
4. Navrhnout parametry pro experimentální ověření řezání velkých tlouštěk.
5. Provést a vyhodnotit experiment.

Seznam doporučené literatury:

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

PILOUS, V. Materiály a jejich chování při svařování, 1 vyd. Škoda-welding, Plzeň, 2009

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

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

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

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

BARAN Marek: Řezání laserem.

Práce pojednává o řezání tlustých ocelových plechů pomocí laserové technologie. Kromě technologických aspektů řezání laserem práce popisuje další využití laseru v praxi a porovnává řezání laserem s jinými technologiemi dělení plechů. V experimentální části byla za pomoci firmy STEELTEC CZ provedena optimalizace polohy ohniska při řezání plechu S235JR tloušťky 20 mm. Získané vzorky vyřezané na CO₂ laseru byly dále porovnány se vzorky řezanými plazmou a vodním paprskem. Zkoumanými parametry byly drsnost, tvar, čas a cena.

Klíčová slova: laser, řezání laserem, řezání plechů, ohnisko, parametry řezání

ABSTRACT

BARAN Marek: Laser cutting.

The thesis elaborates cutting of thick sheet metal using the laser technology. Beside technological aspects of laser cutting, the project also deals with utilising laser technologies in practice and compares laser cutting to other ways of cutting sheet metal. The experimental part, which was realized in STEELTEC CZ, was concerned with optimization of focal point for cutting 20 mm sheet metal of S235JR. The samples which were cut on a CO₂ laser were compared to samples made by plasma and water cutting machines. The researched parameters were roughness, shape, time and price.

Keywords: laser, laser cutting, sheet metal, focus point, parameters of cutting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARAN, Marek. *Řezání laserem*. Brno, 2017. 40s, 1 CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubiček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26.5.2017

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kubičkovi za připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce, firmě STEELTEC za poskytnutí stroje a pomoc s provedením experimentu a nejvíce děkuji své matce, sestře, babičce a přítelkyni za podporu při studiu.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

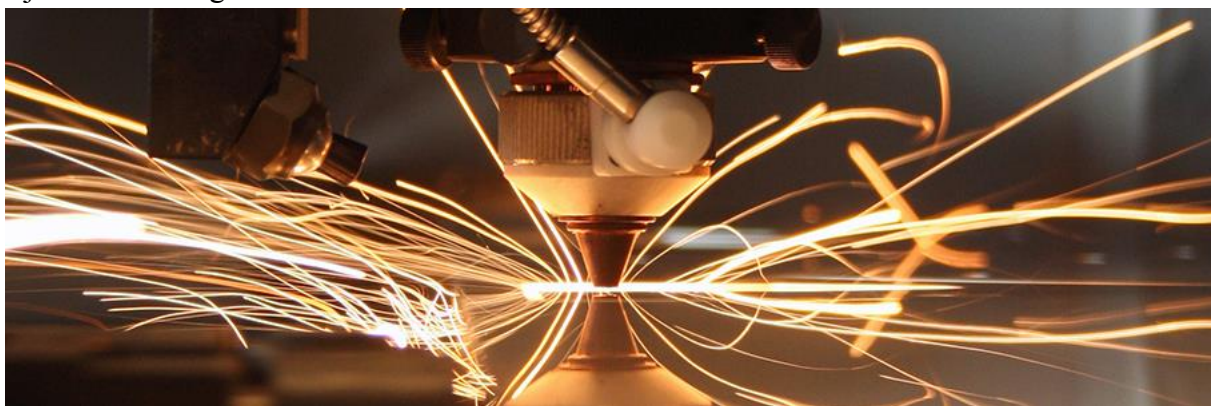
Obsah

ÚVOD	9
1 SOUČASNÝ STAV DĚLENÍ PLECHŮ	10
1.1 Řezání kyslíkem	10
1.2 Řezání plazmou	11
1.3 Řezání vodním paprskem	12
1.4 Řezání laserem	13
1.5 Sumarizační tabulka a graf	14
1.6 Hybridní technologie	15
2. LASEROVÉ TECHNOLOGIE	16
2.1 Fyzikální princip laseru	16
2.2 Rozdělení laserových zařízení	17
2.2.1 Rozdělení podle aktivního prostředí	17
2.2.2 Rozdělení podle metody řezání	22
2.3 Další využití laserových technologií	23
2.3.1 Laserové svařování	23
2.3.2 Vrtání laserem	23
2.3.3 Kalení laserem	24
2.3.4 Další využití laserových technologií	24
2.4 Bezpečnost práce s lasery	25
3. PARAMETRY A TECHNOLOGIČNOST ŘEZÁNÍ	26
3.1 Parametry řezání	26
3.2 Technologičnost řezání ocelových plechů	28
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
4.1 Vstupní informace	29
4.2 Poloha ohniska	30
4.3 Vyhodnocení vzorků	30
5. ZÁVĚRY	40
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratek	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	
Seznam výkresů	

ÚVOD [1,2,3]

V současné době se v České republice, stejně jako v jiných průmyslově vyspělých zemích, velmi hojně využívají laserové technologie. Samotné slovo LASER je anglickou zkratkou pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, tedy zesilování světla stimulovanou emisí. První objevy o této technologii se datují k počátku 20. století, kdy A. Einstein, M. Planck a N. Bohr popsal základní zákony kvantové elektroniky a dále v roce 1917 A. Einstein popsal princip vynucené emise záření. První funkční laser byl sestaven v roce 1960 Theodorem Maimanem a už o pět let později se lasery začaly využívat v průmyslu. Mezitím byly za výzkum v této oblasti uděleny tři Nobelovy ceny za fyziku (N.G. Basov, A.M. Prochorov a C.H. Townes).

Práce je zaměřena zejména na využití laseru ve strojírenském průmyslu, konkrétně k řezání plechů. Protože je tato technologie relativně nová a výzkum stále pokračuje, můžeme očekávat její další rozšiřování v průmyslových podnicích, ať už samostatně nebo sdruženě s jinou technologií.



Obr. 1 Řezání laserem [4]

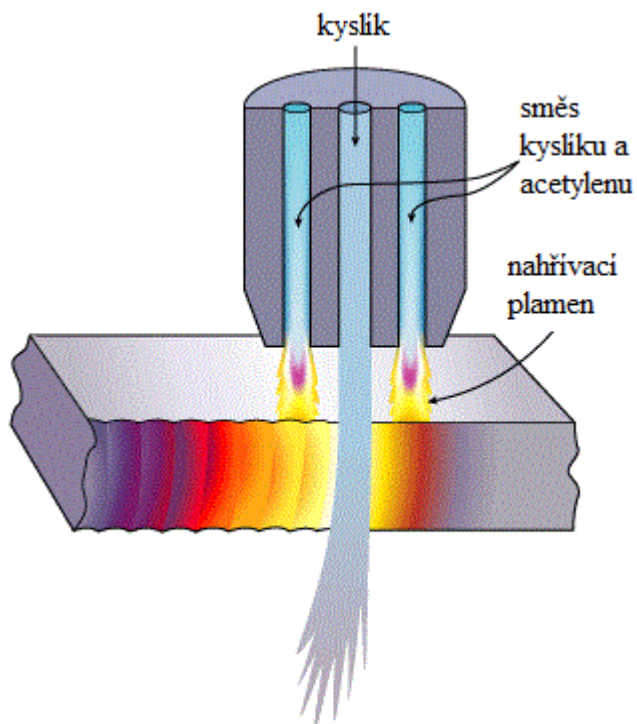
1 SOUČASNÝ STAV DĚLENÍ PLECHŮ

V současnosti se k dělení plechů používá nejčastěji řezání kyslíkem, plazmou a laserem. Tyto tři technologie se řadí do tepelného dělení. Další často využívanou technologií je řezání vodním paprskem, které funguje na principu mechanického obrábění.

1.1 Řezání kyslíkem [5,6,7,8]

Řezání kyslíkem je zřejmě nejstarším

a nejjednodušším způsobem tepelného dělení uhlíkových ocelí. Používá se ve formě jak ruční tak strojní (viz obr 3 a 4). Princip této metody je prostý a skládá se ze dvou fází. V první fázi nahřívací acetylenový plamen zahřeje materiál na jeho zápalnou teplotu, která je pro ocel přibližně 1250 °C a mění se v závislosti na obsahu uhlíku (s rostoucím obsahem uhlíku zápalná teplota roste). V druhé fázi po dosažení zápalné teploty přiváděný kyslík spustí silně exotermickou reakci s železem (spalování) a vytváří se oxidy železa (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4). Schéma řezání kyslíkem zachycuje obr. 2. Teplo z této reakce je na ohřívané místo přenášeno prouděním a zářením a zahřeje materiál na teplotu kolem 4000 °C.



Obr. 2 Schéma řezání kyslíkem [9]

Takto roztavený a spálený kov je následně z řezné spáry vyfouknut tlakem plynů. Aby celý tento proces proběhl, musí být splněny podmínky řezatelnosti:

- I. Zápalná teplota daného kovu musí být nižší než jeho teplota tavení. Z toho vyplývá, že čím větší je obsah uhlíku, tím hůř se dá ocel kyslíkem řezat.
- II. Teplota tavení oxidů musí být nižší než teplota tavení kovu a než teplota, které se během tavení daného kovu dosáhne. Pokud tato podmínka není dodržena, na povrchu se vytvoří vrstva vysokotavitelných oxidů, které se neroztaví a izolují tak kov od kyslíku, čímž se zabrání oxidaci a tím pádem celému řezání.
- III. Při hoření kovu musí být vyvinut dostatek tepla na to, aby se vykompenzoval odvod tepla do okolního materiálu. Poměr tepla získaného z exotermické reakce k teplotě předehřevu by měl být přibližně 80:20.
- IV. Roztavené oxidy železa musí být natolik tekuté, aby je proud plynů dokázal vyfouknout z řezné spáry.

Kyslíkem lze řezat ocel až do tloušťky 2000 mm, což vysoce převyšuje ostatní metody dělení. U ocelí s obsahem uhlíku nad 0,7 % se řezatelnost zhoršuje, protože přestávají být splněny podmínky řezatelnosti a teplotní ovlivnění s sebou nese stále větší nebezpečí vzniku tvrdých struktur (martenzit), které mohou zapříčinit trhliny. Existují však metody, které dovolují tyto problémy překonat:

- Do taveniny se přivádí prášek železa, čímž se v důsledku sníží obsah uhlíku.
- Do trysky se přidá písek, který zajistí snazší vyfoukávání taveniny z řezné spáry.

- Předehřev sníží teplotní gradient a pomůže získat vhodnější strukturu. Platí pravidlo, že nízkouhlikaté oceli se od 50 mm musí předehřívát vždy.



Obr. 3 Strojní řezání kyslíkem [10]



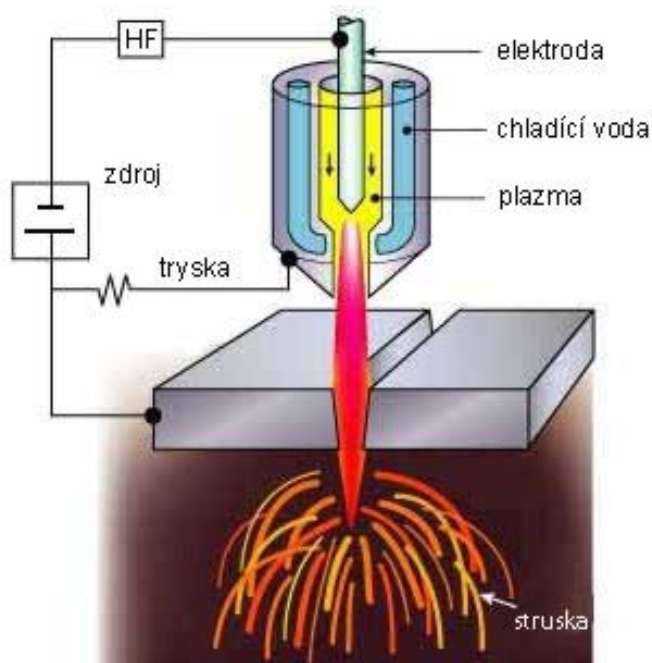
Obr. 4 Ruční řezání kyslíkem [11]

1.2 Řezání plazmou [3,5,6,7,8,12,13]

Technologie řezání plazmou je založena na kombinaci tepelného a dynamického účinku proudícího plazmatu. Teplota dosahuje až 30 000 °C. Metoda je založena na vhánění plazmových plynů (argon, vodík, hélium, stlačený vzduch a jejich směsi) do elektrického oblouku, kde plyny ionizují, a vzniká plazma. Výstupní rychlost plazmy dosahuje až 2300 m.s⁻¹. Počáteční elektrický oblouk (Pilot Arc) hoří mezi netavící se elektrodou (např. z wolframu + 4 % thoria, zirkonu nebo hafnia) a měděnou tryskou (viz obr. 5). Počáteční oblouk obvykle trvá dvě až deset sekund a vystavuje trysku silnému tepelnému namáhání, což ovlivňuje její životnost. Tryska je zpravidla chlazená cirkulující vodou. Řezání se nastartuje v okamžiku, kdy se počáteční oblouk spojí s řezaným materiálem. Materiál je roztaven a tavenina je vyfukována pryč.

Metoda je vhodná pro řezání neželezných kovů, slitin a všechny druhy ocelí. Maximální řezatelná tloušťka je 160 až 250 mm u suchého řezání a 120 mm u řezání pod vodou, avšak z hlediska kvality řezu je vhodná především pro střední tloušťky (3 až 40 mm). Při řezech mimo tento interval jsou řezné spáry postiženy úkosem až 8 %.

Řezání plazmou přináší výrazně vyšší řezné rychlosti než řezání kyslíkem při srovnatelných výrobních nákladech. Nevýhodou plazmy je však hygiena práce. Proces řezání



Obr. 5 Schéma řezání plazmou [12]

je doprovázen ultrafialovým zářením, hlukem a výpary kovů. Tyto problémy se řeší použitím vody. Vodní sprcha snižuje hladinu hluku o 15 Decibelů a řezání pod vodou dokonce eliminuje hluk úplně. Voda má také pozitivní vliv na tepelně ovlivněnou oblast. Navíc barvivo přidávané do vody pohltí záření natolik, že pro člověka není nebezpečné.

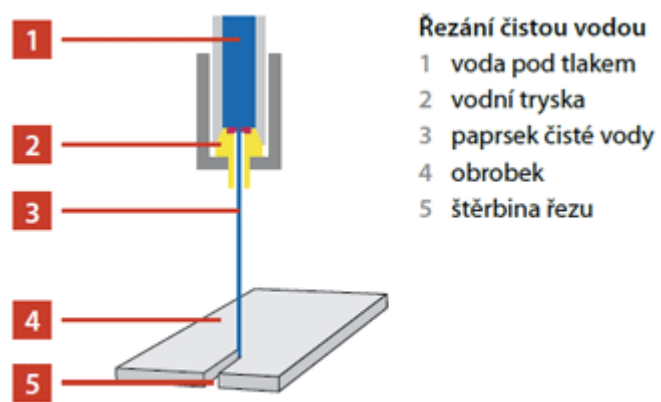
1.3 Řezání vodním paprskem [8,14,15,16]

Metoda řezání vodním paprskem svou fyzikální podstatou sice nezapadá k ostatním zmíněným technologiím, které pro dělení materiálu využívají teplo, ale jakožto jejich alternativa a konkurent by zde měl být zmíněna. Vysoké oblíbenosti na úkor ostatních metod se těší v sousedním Německu.

Vzhledem k odlišnému použitému pracovnímu médiu se řezání vodním paprskem dělí na technologie WJM a AWJ.

- WJM

Water Jet Machining neboli hydromechanické obrábění jako řezný nástroj používá paprsek vody o vysoké rychlosti a tlaku. WJM je používáno zejména k řezání nekovových materiálů – papír, plasty, textil, dřevo atd. Síla samotného vodního paprsku se pro řezání ocelí ukázala jako nedostatečná. Tenký vodní paprsek (průměr bývá v desetinách mm) prochází tryskou vyrobenou ze slinitých karbidů, safíru nebo diamantu rychlostí až $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Použitá kapalina musí být deionizovaná a demineralizovaná. Schéma řezací hlavy je na obrázku 6.

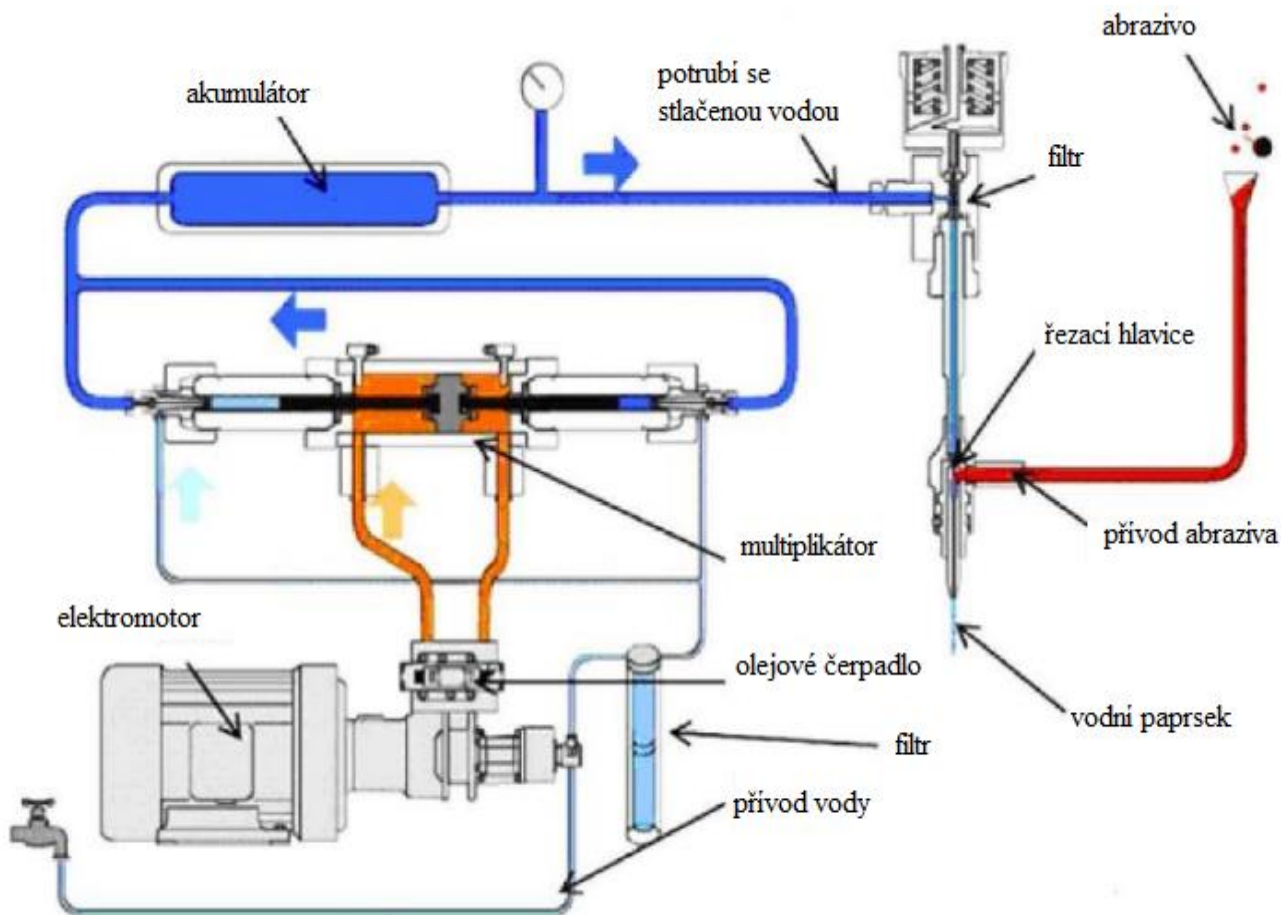


Obr 6. Řezání čistým vodním paprskem [14]

- 1.3.2 AWJ

Abrasive Water Jet Machining (česky obrábění abrazivním paprskem vody) je postaveno na základech WJM, ovšem s tím rozdílem, že do paprsku vody jsou přidány abrazivní částice. Tato změna dovoluje použití vodního paprsku k řezání i tvrdých a houževnatých materiálů. Abrazivo je do proudu kapaliny nasáváno podtlakem, který vzniká, když proud kapaliny prochází hubicí. Moderní stroje dosahují tlaku až 600 barů. Výsledkem je, přesněji může být, velmi přesný a hladký řez. Požadovaná kvalita řezu se totiž specifikuje takzvaným Q, kdy Q1 bývá nejlepší a s rostoucím číslem kvalita klesá. Řez vyšší kvality je pomalejší a dražší. Na rozdíl od metod tepelného dělení nevzniká žádná tepelně ovlivněná oblast a tato technologie není fyzikálně omezena tloušťkou řezaného plechu. V praxi se však řeže zhruba do 150 až 200 mm kvůli době, kterou řezání zabere. Jako abrazivní médium se používá diamantový prášek, drcený rubín, korund a další.

Nevýhodou této technologie je vysoká pořizovací cena. Nákladný je především kompresní systém (multiplikátor) na zajištění vysokého tlaku a je nutno počítat s cenou abraziva. Multiplikátor i přívod abraziva je zobrazen na obr. 7.



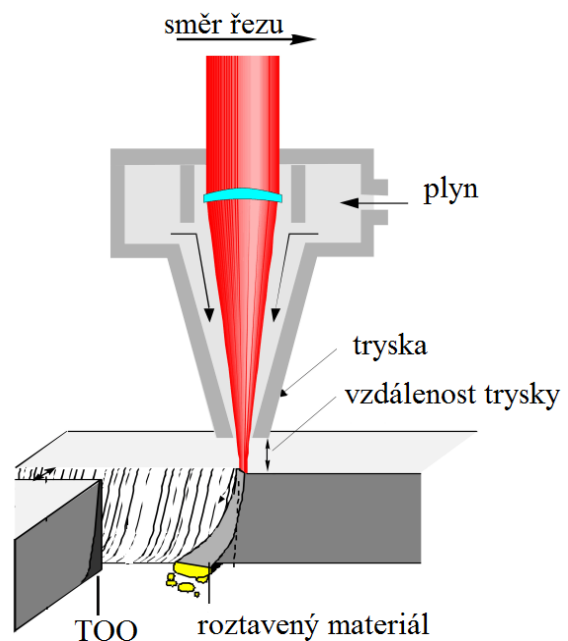
Obr. 7 Schéma zařízení technologie AWJ [15]

1.4 Řezání laserem [3,5,6,8,10,17]

Řezání laserem je v současnosti jedním z nejpoužívanějších způsobů dělení plechů. Vysokou pořizovací cenu kompenzuje spolehlivost, rychlost, vysoký stupeň automatizace a univerzálnost z hlediska řezaných materiálů, protože vysoká koncentrace energie paprsku umožňuje řezat všechny technické materiály bez ohledu na jejich fyzikální, chemické a tepelné vlastnosti. Obvyklé lasery řezou korozivzdornou ocel do 15 mm tloušťky, nelegovanou ocel pak do tloušťky 25 mm (výkonné lasery až 35 mm).

Dělení materiálu je realizováno působením svazku fotonů v kombinaci s pracovními plyny, které se mění v závislosti na řezaném materiálu. Kyslík je používán pro řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, avšak u vysokolegovaných ocelí by způsoboval vznik těžko odstranitelné strusky, takže je nahrazován dusíkem.

Mechanismus odtavení a odstranění kovu se mění v závislosti na použité metodě řezání (sublimační, tavné, oxidační, viz kapitola 2). Výsledkem správně nastaveného řezného procesu je úzká řezná spára (0,05-0,5 mm), hladké řezné stěny bez okují (Ra od cca 1,6).



Obr. 8. Schéma řezání laserem [17]

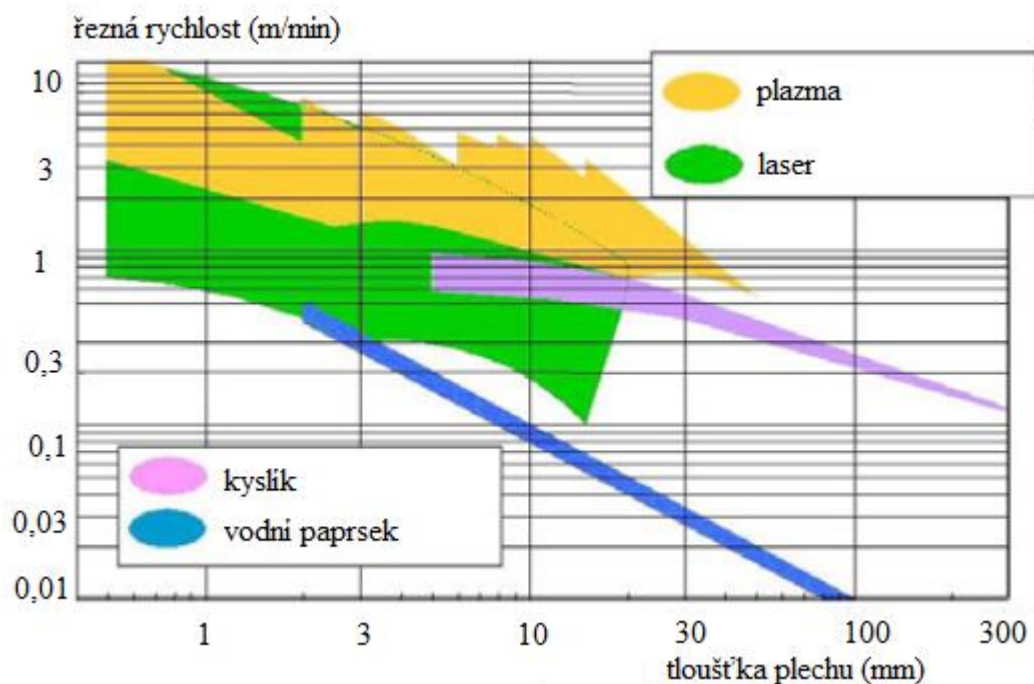
Řezání laserem nemůže být ze své podstaty ruční technologie, neboť kvůli přesně umístěnému ohnisku vyžaduje konstantní vzdálenost hlavičky od řezaného povrchu.

1.5 Sumarizační tabulka a graf

Pro přehlednost jsou klady a zápory jednotlivých způsobů dělení uvedeny v tabulce 1 a řezné rychlosti při řezání nelegované oceli na obr. 9.

Tab. 1 Klady, zápory a vhodnost využití jednotlivých technologií [3,18]

	Klady	Zápory
Kyslík	<ul style="list-style-type: none"> malé investiční i provozní náklady hospodárné využití několika hořáků schopnost řezat i velké tloušťky 	<ul style="list-style-type: none"> vhodné jen pro nízkouhlikatou ocel nízká řezná rychlost velká TOO špatné pro tloušťky do 5 mm
Plazma	<ul style="list-style-type: none"> vysoká řezná rychlost řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem bez alternativy pro řezání vysokolegovaných ocelí a slitin hliníku o střední a větší tloušťce 	<ul style="list-style-type: none"> hluk, výpary, UV záření větší úkos než u řezání kyslíkem vysoké pořizovací náklady
Vodní paprsek	<ul style="list-style-type: none"> řezání kovových i nekovových materiálů nevzniká TOO úzká řezná spára vynikající kvalita řezu 	<ul style="list-style-type: none"> vysoké investiční i provozní náklady použití více hubic vyžaduje ještě silnější a dražší kompresní systém nízká řezná rychlost
Laser	<ul style="list-style-type: none"> vysoká přesnost a kvalitní řezná hrana u malých tloušťkách vysoká řezná rychlost u malých tloušťkách tenká řezná spára 	<ul style="list-style-type: none"> vysoké investiční i provozní náklady (podle typu) jen malé a střední tloušťky snížení stability procesu při řezání plechů s lesklým povrchem

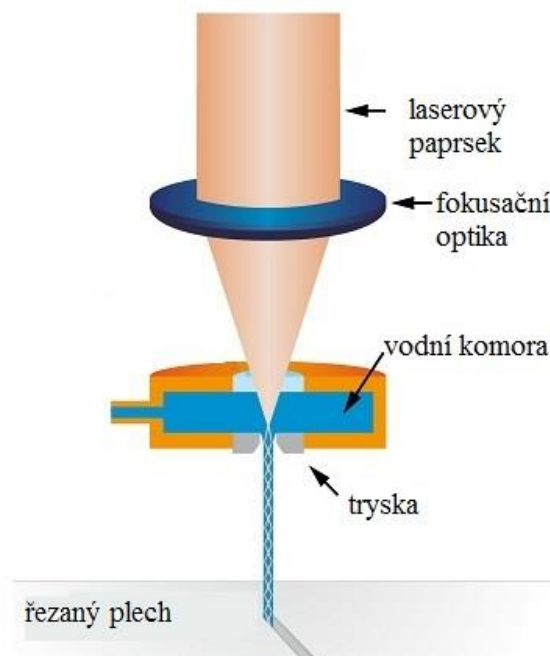


Obr. 9 Graf závislosti řezných rychlostí na tloušťce plechu nelegované oceli [10]

1.6 Hybridní technologie [19,20,21]

Výsledkem rozdílným vlastností a výhod různých technologií dělení materiálů bylo vytvoření nových metod, jejichž cílem je kombinovat výhody a odstraňovat slabiny daných řezných procesů.

Laser MicroJet je kombinací řezání laserem a vodním paprskem. V tomto případě má však vodní paprsek nižší tlak (100-300 barů) a jeho funkce není řezat, nýbrž vytvořit velmi tenký sloupec (20-160 μm), kterým má vést laserový paprsek. Výsledný řez má extrémně úzkou řeznou spáru, výbornou kvalitu a díky vodnímu prostředí nedojde k podstatnému tepelnému ovlivnění materiálu. Díky vodnímu paprsku je navíc povrch čistý, bez rozstříků. Samotná spotřeba vody je díky tenkému paprsku malá. Prodejce udává spotřebu jeden litr za hodinu při tlaku 300 barů. Schéma zařízení LMJ je na obrázku 10.



Obr. 10 Schéma LMJ [20]

2. LASEROVÉ TECHNOLOGIE

Laserové technologie jsou velmi dynamicky rozvíjejícím se oborem. S rostoucími znalostmi laserů rostou možnosti jejich využití a již dnes jsou používány jak ve většině vědních oborů lidské činnosti tak také v každodenním životě.

2.1 Fyzikální princip laseru [1,2,6,22,23]

Laser je kvantový generátor a zesilovač záření pracující na principu stimulované emise záření v aktivním prostředí, které je následně zesilováno v rezonátoru a poté fokusováno optikou na požadované místo.

Výchozími mechanismy jsou absorpce a spontánní emise záření, kterou popisuje Bohrova teorie elektronového obalu: Elektron při přechodu na nižší energetickou hladinu (E_1) samovolně a náhodně vyzáří foton, jehož energie je rovna rozdílu energie elektronu na daných energetických hladinách. Naopak pokud elektron přijme foton o určité energii, přejde na vyšší energetickou hladinu (E_2). Energie fotonu musí odpovídat rozdílu dvou energetických hladin, jinak k vybuzení (excitaci) nedojde. Toto popisuje vzorec 2.1.1:

$$h \cdot f_{12} = E_2 - E_1 \quad (2.1.1)$$

kde h je Planckova konstanta $6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

f_{12} je frekvence kmitání odpovídající přechodu E_1 až E_2 (Hz)

E_1 je základní, stabilní stav

E_2 je excitovaný (vybuzený), nestabilní stav

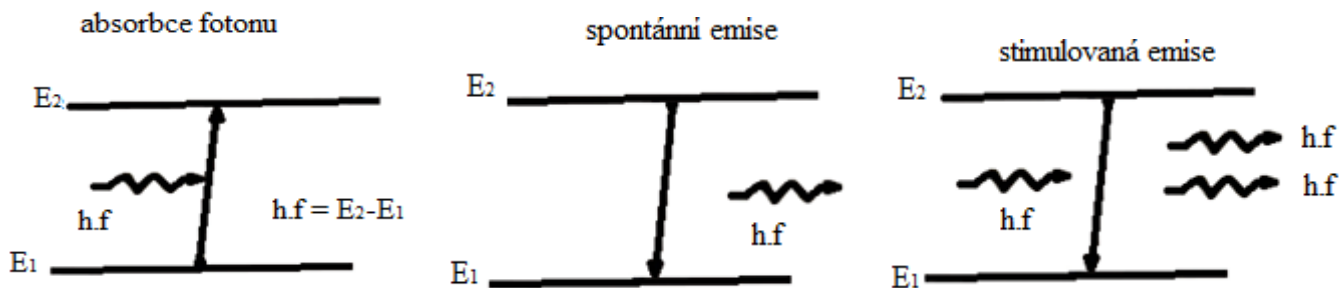
Atom ve vybuzeném stavu zůstane jen chvíli (řádově 10^{-8} s). Poté se vrátí na nižší energetickou hladinu, přičemž přijatý foton odešle náhodným směrem pryč. Jev spontánní emise je nevyužitelný, protože vyslané fotony mohou mít různé vlnové délky a nelze je zesílit.

Alfred Einstein zjistil, že kromě spontánní emise existuje i emise vynucená neboli stimulovaná (obr. 11), která vyzařuje fotony o stejné vlnové délce a směru, jako měl iniciační foton. K vynucené emisi dochází, když již excitovaný atom přijme další foton dříve, než se stihne vrátit na základní energetickou hladinu. Pokud se tak stane, vyzáří se oba fotony o stejné vlnové délce a stejným směrem. Tyto dva fotony se spojí a vzniká tak jedna vlna o dvojnásobné amplitudě a tím pádem dvojnásobné energii.

Podmínkou funkčnosti laserů je populační inverze, která nastává díky aktivnímu prostředí. Tento pojem označuje stav, kdy je v atomu na metastabilní energetické hladině více elektronů než na hladině stabilní. Důsledkem je řetězová reakce. Takto získáváme kvantový zesilovač monochromatického elektromagnetického záření. Umístěním aktivního prostředí do rezonátoru se zesilovač změní na generátor.

Laserový paprsek má tyto vlastnosti:

- monochromaticnost (vlnění má stejnou vlnovou délku)
- vysoká koherence (vlnění bez fázových posunů)
- malá rozbíhavost svazku fotonů
- vysoká hustota výkonu (pro řezání cca $10^{10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)
- svazek fotonů nemá elektrický náboj a není ovlivňován magnetickým polem



Obr. 11 Schéma základních procesů v laseru [2]

Při interakci laserového paprsku s materiálem fotony narážejí do vibračních mřížek atomů, čímž zvyšují jejich frekvenci a tím zvyšují teplotu materiálu. Energie paprsku se při dopadu na povrch částečně odrazí, část je pohlcena a využita pro ohřev a velice malá část projde materiálem. Pro dělení je efektivní pouze ta část, která je pohlcena a proniká do hloubky. Jak hluboko záření pronikne, závisí na výkonu zdroje, frekvenci záření a vodivosti materiálu.

2.2 Rozdělení laserových zařízení [1,2,3,5]

Po desítkách let výzkumu laserových technologií existuje dlouhá řada různých druhů, metod a režimů využívání laseru. Základní princip sice zůstává pořád stejný, přesto se však na trhu vyskytuje široká škála laserů, jejichž účel často vybočuje z odvětví strojírenství.

Rozdělení laserových zařízení z hlediska:

- a) aktivního prostředí
 - pevnolátkové
 - polovodičové
 - plynové
 - kapalinové
- b) režimu vyzařování
 - kontinuální
 - pulsní
 - kvazikontinuální
- c) metodě řezání
 - sublimační
 - tavné
 - oxidační

2.2.1 Rozdělení podle aktivního prostředí [1,2,3,5,24,25,26,27,28,29,30,31,32]

- Pevnolátkové lasery

Aktivní prostřední pevnolátkových laserů je tvořeno krystalickými, případně amorfními látkami. Pevná látka má hlavně funkci tvořit nosnou matici aktivního prostředí, protože k samotnému zesilování elektromagnetického vlnění dochází jen na elektronových přechodech iontů příměsí. Nejčastěji se používají ionty vzácných zemin (např. Nd^{3+}), ale i další (Cr^{3+}). Jako nosný materiál může být použit například korund nebo sklo.

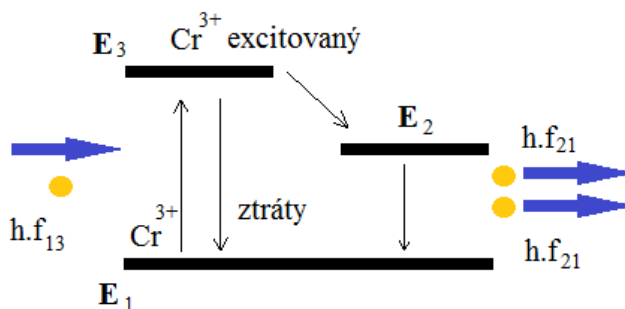
Rubínový laser je historicky nejstarším typem laseru. Jak už bylo řečeno v úvodu, tento laser sestrojil T.H. Maiman roku 1960. Byl jako první použit k opracovávání materiálů, konkrétně k mikrovtání kamenů. Aktivní prostředí je tvořeno rubínem – drahokamem, který se skládá z korundu Al_2O_3 (nosný materiál) a příměsí iontů Cr^{3+} (koncentrace je velmi malá, asi 0,05%). Z laseru vychází záření o vlnové délce 0,694 μm . Účinnost je nízká, do 0,1%. Princip (znázorněn na obrázku 12) je následující: Výbojka bílým světlem ozařuje výbrus rubínu. Ionty, které pohltní vhodné kvantum energie (viz vzorec 2.1.1), přejdou z energetické

hladinu E_1 na hladinu E_3 . Na této hladině vydrží po dobu $t_{32}=10^{-8}$ s a poté padají na metastabilní hladinu E_2 , aniž by vyzářily přijatou energii zpět do okolí. Na hladině E_2 vydrží ionty po dobu $t_{21}=10^{-3}$ s, tedy mnohem delší dobu, než kterou strávily na hladině E_3 , což vede k inverzi populace, tedy k jevu, kdy je na hladině E_2 více iontů než na základní hladině E_1 . Jak už bylo předesláno v kapitole 2.1, stav populační inverze vede ke spuštění stimulované emise a řetězové reakce, kterou pak dále zesiluje rezonátor.

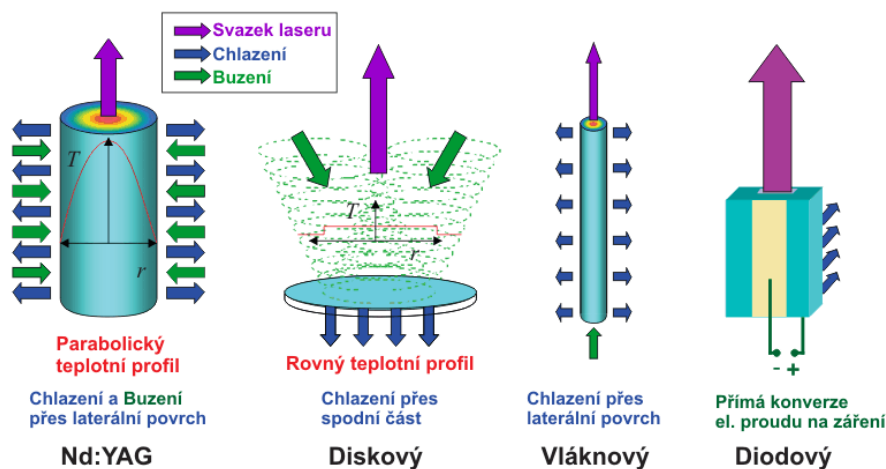
Po nashromáždění dostatečného (kritického) množství fotonů v rezonátoru část záření projde polopropustným zrcadlem rezonátoru ve formě krátké pulsu o vysoké energii.

Na rozdíl od rubínového laseru, Nd:YAG laser umí pracovat i v kontinuálním režimu. Název Nd:YAG říká, že aktivní prostředí je tvořeno yttrito-hlinitým granátem (nosný materiál) a neodymovými ionty Nd^{3+} . Původně čerpání zajišťovala kryptonová výbojka. Tento laser generoval záření o vlnové délce $1,064 \mu\text{m}$ při účinnosti kolem 10%. V současnosti se u (nejen) Nd:YAG laserů pro čerpání používají diody, které vyzařují jen světlo ve spektru, které ionty neodymu dokáží využít. Takové lasery mají v kontinuálním režimu výkon až 5 kW a účinnost 30%. Dalším rozdílem oproti rubínovému laseru je fakt, že Nd:YAG pracuje se čtyřmi energetickými hladinami. S výhodami oproti rubínu v podobě vyšší účinnosti a vyšší frekvenci při pulsním režimu ale přichází i nevýhoda v podobě náročné výroby kvalitních monokrystalů YAG. Někdy se proto z důvodu financí jako nosný materiál používá speciální sklo a v takových případech se mluví o laseru Nd:sklo. Sklo je sice jednodušší vyrobit, ale kvůli špatné tepelné vodivosti vznikají problémy s chlazením při vyšších výkonech. Z toho důvodu jsou Nd:sklo lasery používány většinou pouze v pulsním režimu s malou pulsní frekvencí.

Přestože knižní zdroje hovoří o Nd:YAG jako o nepoužívanějším pevnolátkovém laseru, v aktuální nabídce firmy TRUMPF figurují pevnolátkové lasery, které místo iontů Nd^{3+} používají ionty ytterbia (Yb:YAG) s diodovým čerpáním a aktivní prostředí je tvořeno diskem (viz obr 13).



Obr. 12 Princip rubínového laseru [3]

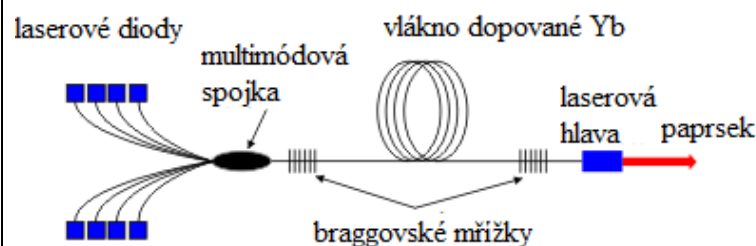


Obr. 13 Geometrie aktivního prostředí [26]

Diskový laser vznikl jako inovace Nd:YAG za účelem vyřešit problémy s chlazením a zvýšit kvalitu výstupního svazku.

- Polovodičové lasery

Jak název napovídá, aktivním prostředím těchto laserů je polovodič s PN přechodem. Striktně vzato patří do skupiny pevnolátkových laserů, ale kvůli své specifčnosti jsou někdy řazeny separovaně. Buzení obstarává elektrická energie, která je absorbována atomy na přechodové vrstvě. Ty pak přecházejí z pásu valenčního do pásu vodivostního a opět probíhá již probraná stimulovaná emise. Funkci rezonátoru plní vybroušené hrany krystalu. Polovodičové lasery někdy bývají nazývány jako laserové diody. Z pohledu na obr. 14 je patrné, že kromě samotného řezání může být účelem těchto laserů i buzení jiných laserů a vzhledem k miniaturním rozměrům a nízkým výrobním nákladům jsou široce využívány i mimo strojírenství, například ve výpočetní technice.



Obr. 14 Schéma vláknového laseru [27]

Nejperspektivnějším typem

polovodičových laserů je vláknový laser (fiber). Zvládá jak pulsní tak kontinuální režim. Aktivní prostředí je tvořeno křemíkovým (optickým) vláknem dopovaným yterbiem. Na začátku vlákna jsou budící diody, které pomocí multimódové spojky vytvoří vstupní laserový paprsek. Ten se pak šíří dále do vlákna, ve kterém se díky braggovským mřížkám odráží a stimuluje emisi (braggovské mřížky jsou struktury vytvořené v optickém vlákně, které fungují jako zrcátka odrážející pouze světlo dané vlnové délky). Paprsek je pak vláknem veden až do konce vlákna v laserové hlavě, kde je optikou zaostřen do požadovaného bodu, viz obr. 14.

Kromě vlastností v tabulce 2 uvedené níže má fiber oproti ostatním typům hlavně výhodu ve své rychlosti a jednoduchosti. Optické vlákno totiž nahrazuje složitou a drahou optickou soustavu jiných laserů. Odpadají také nároky na chlazení a potřeba údržby. Na řezání tenkých plechů je vláknový laser zkrátka ideální volbou.

Tab. 2 Přehled parametrů základních laserů [26]

Laser	Buzení	Účinnost	Režim	Výkon / Energie	Údržba	Život. (h)
Nd:YAG	laser. diody	~7%	kontinuální	až 6kW	ano	~10 000
	lampy	~3%	pulsní	~ mJ/ns (~100W)		~1000
CO ₂	radiofrekvenčně	~10%	kontinuální / pulsní	10-250W až 5kW (slab)	ano	~20 000
	elektricky	~25%		až 20kW (průtočné)		--
Diskový	laser. diody	~15%	kontinuální	až 16 kW	ano	~10 000
Vláknový	laser. diody	~30%	kontinuální	až 80 kW	ne	~100 000
			kvazikontinuální	~ J/ms (~1,2kW)		
Diodový	elektricky	~60%	pulsní	~ mJ/ns (~100W)	ne	~15 000
			kontinuální	až 10kW		

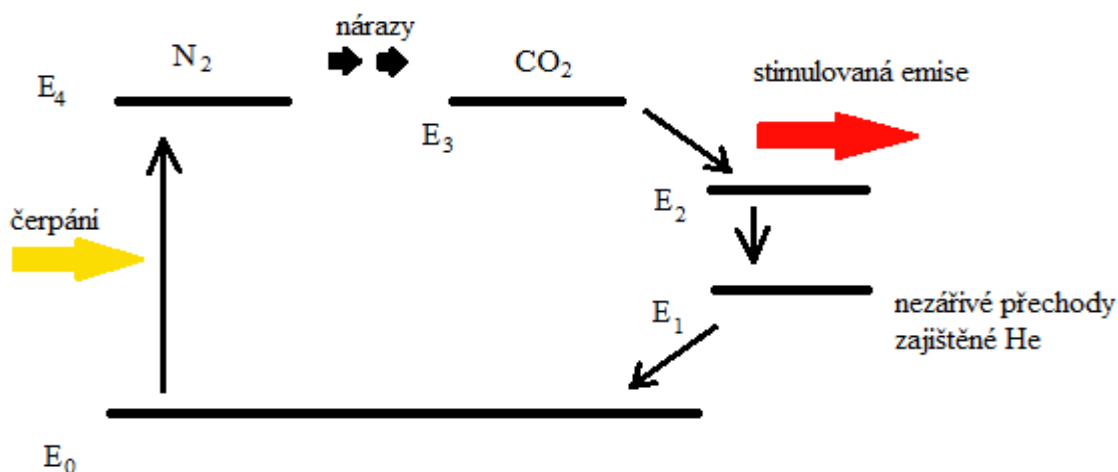
- Plynové lasery

Tato zařízení používají aktivní prostředí v plynné fázi, a to v různých kombinacích. Budit lze elektrickým výbojem, chemickou reakcí, rychlou expanzí plynu, průchodem elektronů

a dalšími způsoby. Nejstarším typem je helium-neonový laser, který byl vynalezen v roce 1960, a používá se pro měření vzdáleností a holografii. Existuje mnoho různých plynových laserů, například argonový, helium-kadmiový, ale v současnosti se využívají excimerové a CO₂ lasery.

Excimer je složenina výrazu excitovaný dimér. Aktivní prostředí je založeno na směsi vzácných plynů, jejichž molekuly v excitovaném stavu tvoří excimery, což jsou nestabilní molekuly, které existují jen na přechodnou dobu v důsledku vzájemného působení excitovaného atomu a atomu v základním stavu. Vlnové délky paprsku leží v ultrafialové oblasti spektra (193 až 351 nm). Excimerový laser nalézá využití v průmyslu, kde se využívá k mikroobrábění, v medicíně, kde slouží k léčbě dermatologických potíží a také v měřicí technice.

CO₂ laser je v současnosti jeden z nejpoužívanějších laserů pro dělení a svařování materiálů. Byl vynalezen v roce 1964 indickým fyzikem C. K. N. Patelem. Tyto lasery umí pracovat v kontinuálním i pulsním režimu a to při větší účinnosti než Nd:YAG lasery (do 20 %). Výkon se běžně pohybuje od 0,5 do 20 kW s maximem až 200 kW. Aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů He, N₂ a CO₂ v poměru obvykle 82:13,5:4,5. Tyto plyny jsou uzavřeny ve skleněné trubici. Helium a dusík podporují laserový proces v molekule oxidu uhličitého. V souvislosti s řezáním laserem je vhodné si uvědomit, že se rozlišují plyny rezonátorové (pomocné), které jsou nutné pro samotný vznik paprsku, a plyny asistenční (řezné), které zajišťují úspěšný řez. Paprsek CO₂ laseru leží v infračerveném spektru, takže pro lidské oko není viditelný. Princip je popsán na obrázku 15. Laserový proces začíná jako vždy buzením – plynovým výbojem při vysokém napětí nebo vysokofrekvenčním střídavém napětí se uvolní elektrony, které narážejí do molekul dusíku a excitují je na vibrační hladinu E₄, kde začnou kmitat a narážet do molekul oxidu uhličitého. Tím jim molekuly dusíku předají svou energii a pozvednou je na hladinu E₃, na které se rozkmitají. Při přechodu na dolní laserovou hladinu E₂ se vyzáří kvantum energie (foton) o vlnové délce 10 600 nm. V tomto okamžiku je zapotřebí, aby atomy helia plnily svou chladicí funkci - srážkami s molekulami CO₂ z nich odnímají excitační energii, což CO₂ vrátí zpět na základní hladinu E₀.



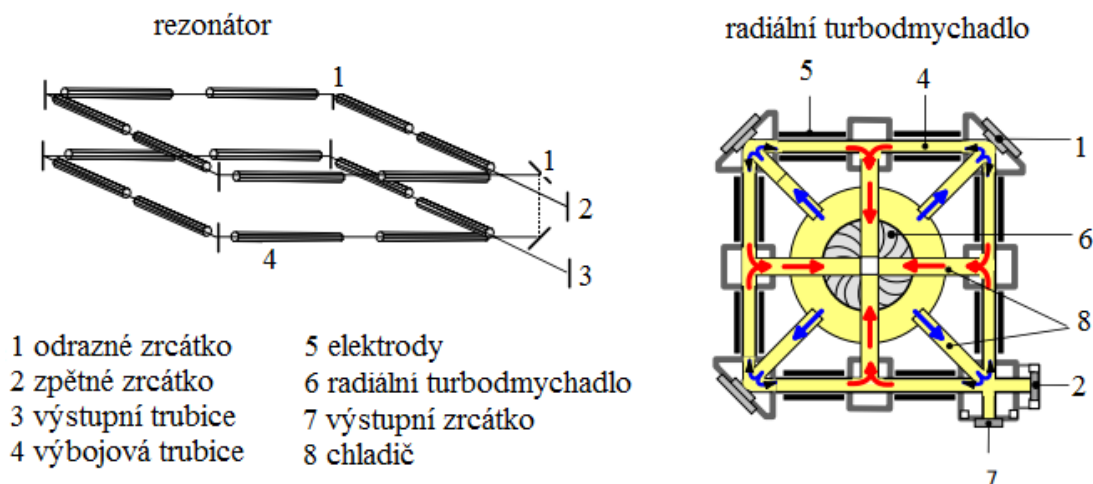
Obr. 15 Princip plynového laseru [3]

CO₂ lasery se dělí podle směru proudění plynů aktivního prostředí a jejich chlazení na:

- a) s prouděním aktivního média
- b) s difuzním chlazením

Výkon laserů s prouděním aktivního média závisí na délce rezonátoru, tedy trubice, kterou aktivní médium proudí. Konkrétní hodnoty se liší podle směru proudění. Lasery s pomalým axiálním prouděním dosahují přibližně 50 W výkonu na 1 metr délky rezonátoru. U laserů s rychlým axiálním prouděním je výkon vyšší, mezi 500 až 1000 W na jeden metr, ale

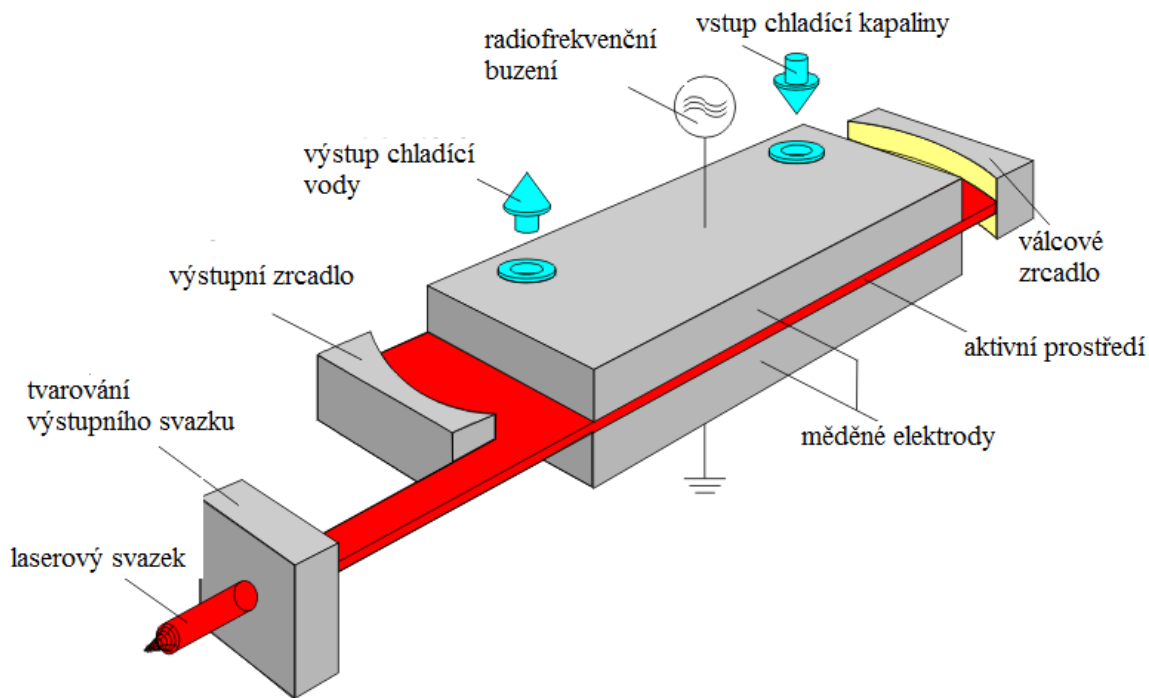
zároveň produkuje méně kvalitní řezy. Lasery s příčným prouděním mají také výkon okolo 1 000 W, ale používají se pro jiné aplikace než je řezání, například pro svařování a kalení. Pro výkonové lasery s výkonem několik kW by byl zapotřebí rezonátor dlouhý několik metrů, což je ovšem nepraktické. Aby se v praxi dosáhlo kompaktnějších rozměrů stroje, uspořádají se rezonátory například kvadraticky za sebe, při vyšších výkonech i do dvou úrovní (obr. 16). Plynulost laserového paprsku v rozích zajišťuje soustava zrcátek. Cirkulaci plynů v takto uspořádaném rezonátoru zajišťuje radiální turbodmychadlo (obr. 16). Chlazení plynů probíhá tak, že plyn proudí kolem tepelných výměníků, kterými protéká voda.



Obr. 16 Skládaný rezonátor a radiální turbodmychadlo [24]

U difuzně chlazených laserů směs plynů neproudí, pouze se mísí s plynem v integrované plynové lahvi, která je připojena k rezonátoru. Plyn v rezonátoru se plně promísí nejpozději každých 72 hodin. Jedna taková láhev vydrží jeden až dva roky provozu. To přináší velkou úsporu rezonátorových plynů, které jsou pro svou vysokou požadovanou čistotu relativně drahé. Chlazení směsi plynů probíhá difuzí tepla do plochých měděných elektrod. Pro dobrý odvod tepla by elektrody měly mít co největší plochu a co nejmenší vzdálenost od rezonátoru. Samotné elektrody jsou pak chlazeny klasicky cirkulující vodou. Lasery s konstrukcí plochých elektrod se označují jako slabé lasery, viz obr. 17. Další variantou konstrukce je složení rezonátoru ze dvou do sebe zasunutých trubic, které jsou chlazené vodou a současně slouží jako vysokofrekvenční budící elektrody. Aktivní prostředí (plyn) se nachází v prostoru mezi zmíněnými trubicemi. Tato konstrukce je známá pod názvem Coax laser.

Difuzně chlazené lasery mají oproti konkurentům několik výhod: kompaktní zdroj, nízká spotřeba plynu, malé rozměry, nízké provozní náklady, střední výkonový rozsah při vysoké kvalitě paprsku. Výkon difuzně chlazených laserů je dostačující pro povrchové úpravy, svařování i řezání.



Obr. 17. Difuzně chlazený laser (slab) [32]

- Kapalinové lasery

Aktivní prostředí kapalinových laserů je tvořeno roztoky organických barviv. Buzení je prakticky čistě optické (výbojkou nebo jiným laserem). Nevýhodou tohoto laseru je fakt, že se jeho aktivní prostředí působením tepla a světla rozkládá. Použitím různých barviv lze docílit různých vlnových délek, pročež našel své uplatnění v oboru spektroskopie a fotochemii. Pro účely dělení materiálu je pro svůj nízký výkon nepoužitelný.

2.2.2 Rozdělení podle metody řezání [2,3, 17, 24]

- Sublimační řezání

Laserový paprsek v pulsním módu lokálně zahřeje materiál na teplotu vypařování. V prodlevách mezi pulsy se kov odpařuje pryč, což navíc může být podpořeno foukáním inertního plynu. Při řezání plechů nesmí být tloušťka plechu větší než tloušťka paprsku, jinak by páry opět zkondenzovaly a místo řezu by vznikl svar. Toto pravidlo neplatí pro materiály, které se netaví, např. dřevo a keramika. Tato metoda se dá využít pro řezání jen velmi tenkých plechů, tenkých fólií a vrtání minerálů.

- Tavné řezání

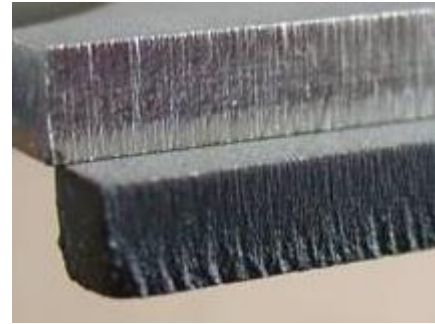
Laserový paprsek v kontinuálním módu ohřeje materiál na teplotu tavení, načež je tavenina z řezné spáry vyfouknuta silným proudem inertního plynu (např. dusík). Častým jevem je zatuhnutí kapek taveniny na spodní hraně řezu, jejichž vznik je způsoben právě nedostatečným tlakem plynu. Nastavení tlaku závisí na šířce spáry, materiálu a na použitém plynu. Běžně se používá tlak 10 až 20 barů. K chemické reakci dusíku s taveninou nedochází. Výjimku však tvoří titan, protože s dusíkem prudce reaguje. Proto se k řezání titanu používá argon. Rychlost této metody řezání je nízká – lineárně roste s výkonem stroje a klesá s tloušťkou materiálu. I přesto je tavné řezání používané, neboť kvůli užití inertního plynu nevzniká vrstva oxidů železa. Z tohoto důvodu se používá pro řezání vysokolegované oceli (nerez), hliník, nikl, měď a jejich slitiny i nekovové materiály (keramika, plexisklo).

- Oxidační řezání

Laserový paprsek ohřeje materiál pouze na zápalnou teplotu, poté se spustí silně exotermická reakce (spalování). Pracovním plynem je kyslík o čistotě 99,95 % natlakovaný na 3 až 5 barů. Řezná rychlost je výrazně vyšší než u tavného řezání. Kvalita řezu sice není tak dobrá jako u tavného řezání, ale řez je rychlejší. Oxidační řezání se používá

pro řezání nelegované a středně legované oceli.

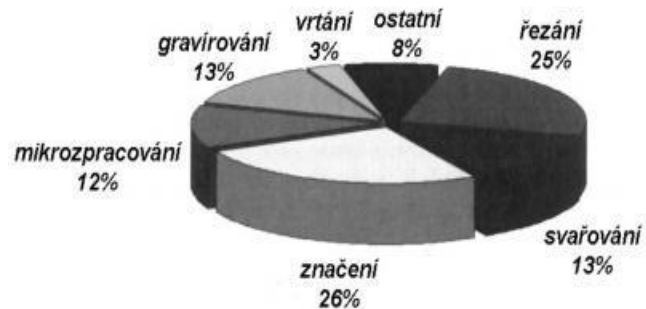
Na obr. 18 lze vidět 2 nerezové plechy. Nerez se obvykle řeže dusíkem (horní plech), protože při použití kyslíku jako asistenčního plynu (dolní plech) vzniká vrstva oxidů chromu, které jsou černošedé, drsné a velmi tvrdé, takže se těžce odstraňují. Ve prospěch kyslíku hraje fakt, že náklady jsou o zhruba 20 % nižší.



Obr. 18 Dusík x kyslík [37]

2.3 Další využití laserových technologií [2,33]

Laserová technika si za dobu své existence vydobyla silné postavení v různých oborech – strojírenství, elektrotechnika, medicína, vojenský průmysl a další. Důvodem jsou jedinečné vlastnosti laserového paprsku, které mu zajišťuje jeho monochromaticnost a koherence. Na obr. 19 je zobrazeno procentuální rozdělení laserových technologií ve strojírenství.



Obr. 19 Využití laseru ve strojírenství [33]

2.3.1 Laserové svařování [2,3,33,38]

Laserové svařování se řadí mezi tavné způsoby svařování. Pro účely svařování se používají pevnolátkové, diodové a plynové lasery. Oproti řezání je potřeba menší intenzity záření. Podstatou svařování laserem je tzv. key hole (klíčová dírka), tedy kuželovitý otvor vyplněný parami roztaveného kovu vznikající působením paprsku na materiál. Svar má na výbrusu typický dlouhý úzký tvar.

výhody svařování laserem:

- vysoká rychlost i kvalita svaru
- bez potřeby přídavných materiálů, bez odpadu
- vysoká přesnost
- snadná automatizace
- malé vnesené teplo a TOO
- stále častější využití hybridů laser/TIG, laser/MAG
- nízké požadavky na přípravu povrchu

nevýhody:

- drahý stroj

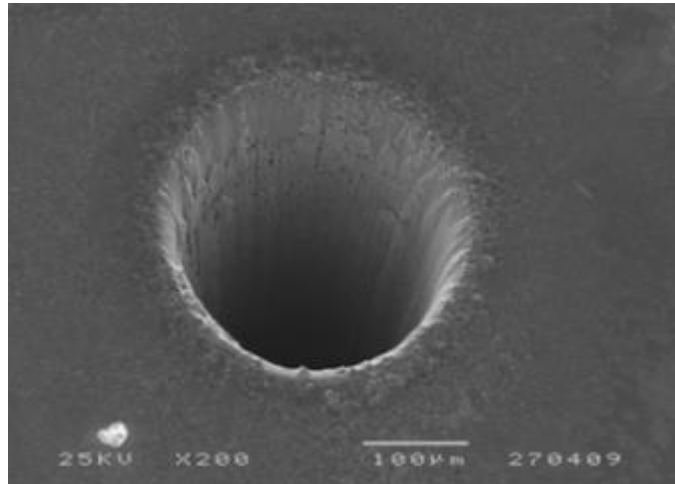
2.3.2 Vrtání laserem [2, 34, 35,36]

Lasery se používají pro vrtání velmi úzkých dlouhých otvorů od průměru 0,1 mm až do 1,5 mm nebo do hloubky 15 mm. Pro větší rozměry už laser není vhodný. Poměr hloubka:průměr může být až 50:1. Intenzita záření musí být velmi vysoká, asi o řád vyšší než při řezání, a proto se zpravidla používají Nd:YAG nebo vláknové lasery v pulsním režimu. Princip je podobný jako při řezání: Série pulsů zahřívá materiál. Ten se částečně odpařuje a zbytek je ve formě taveniny vypuzen tlakem par pryč. Tlak v díře vzniká odpařováním, při kterém se prudce zvyšuje objem materiálu.

Při vrtání laserem nacházejí uplatnění tzv. pikosekundové a femtosekundové lasery, které jsou schopny vysílat ultrakrátké pulsy, řádově v desítkách ps a stovkách fs (1 fs odpovídá

10^{-15} s). Ty jsou tak krátké, že se materiál odpaří dříve, než stačí předat teplo svému okolí, což dovoluje obrábět materiály citlivé na tepelné ovlivnění. Laserem se dají vrtat všechny technické materiály – ocel, hliník, plast, dřevo atd. Mezi výhody patří rychlost, přesnost, bezkontaktnost a v některých případech dokonce technologická nenahraditelnost.

Na obr. 20 je zachycen pohled do elektronového mikroskopu na díru v nerezavějící oceli vrtané femtosekundovým vláknovým laserem.



Obr. 20 Laserem vrtaná díra [36]

2.3.3 Kalení laserem [2,39,40,41]

Pro kalení laserem se používají CO_2 , Nd:YAG, vláknové a také výkonné diodové lasery. Laserem lze kalit konstrukční ocel, vysoce legovanou ocel, nástrojovou ocel a litiny. Obsah uhlíku musí být větší než 0,2 %. Laserový paprsek zahřeje materiál pod teplotu tavení (900-1400 °C), kdy dochází k austenitizaci, a vzniká jemnozrná struktura s malými jehlicemi martenzitu. Výdrž na této teplotě je od 0,001 do 10 sekund. Ochlazování probíhá samovolně odvodem tepla do okolního materiálu. Povrch po kalení bývá dobrý, někdy bez nutnosti obrábění. Vzniku zoxidované povrchové vrstvy se dá zabránit použitím asistenčního plynu, který v okolí paprsku vytvoří ochrannou atmosféru. Hloubka, do které lze kalit, je dána vodivostí a tloušťkou kaleného materiálu. Obecně platí, že pro dosažení dostatečně rychlého odvodu tepla, by měla být tloušťka materiálu desetkrát větší než kalená hloubka. Pokud součástka tuto poučku nespĺňuje, dá se situace vyřešit externím dochlazováním proudem vzduchu nebo chladicím médiem. Protože se běžně zakalují plochy a ne pouhé body, je paprsek nastaven na co největší plochu. Další variantou je použití skenerové optiky, která velmi rychle pohybuje paprskem tam a zpět a vytvoří tak pruh s dostatečně rovnoměrným výkonem. Takový pruh může být široký až 60 mm.

Mezi výhody kalení laserem patří fakt, že relevantně zahřívá pouze tenkou vrstvu materiálu, takže součást získá zakalený tvrdý povrch, ale uvnitř si zachová svou houževnatost. Další výhodou je, že laser umožňuje kalit pouze určená místa, například funkční plochy ozubených kol. Rychlost, spolehlivost a kvalita je jako u jiných laserových technologií jako opět vysoká. Vysoká rychlost ohřevu však znamená posun transformačních teplot směrem nahoru, což znamená, že pro tento typ kalení neplatí klasické diagramy tepelného zpracování oceli.

2.3.4 Další využití laserových technologií [2,42,43]

V oboru strojírenství se dále laser využívá ke gravírování, navařování a další. Z dalších oborů stojí za zmínku lékařství, kde se laser využívá při mnoha k řešení očních vad (např. krátkozrakost, astigmatismus) nebo jako tzv. nekrvavý skalpel. Hloubka řezu je dána nastavením výkonu a délkou pulsu. Paprsek při kontaktu s tkání koaguluje cévy, takže je řez nekrvavý a i z tohoto důvodu velmi přesný. Rozostřený laserový paprsek se dá použít jako nástroj k zastavení krvácení. Oproti klasickému skalpelu se řezy provedené laserem vyznačují menší pooperační bolestí a vzhledem ke své bezdotykové podstatě zajišťuje sterilitu.

Velké uplatnění nacházejí lasery také v měřicí technice a elektronice.

Zajímavostí je využití laseru ve vědě, konkrétně mezinárodní projekt laserového centra ELI Beamlines situovaného v Dolních Břežanech (okres Praha-západ), které má být zpřístupněno v roce 2018. Cílem projektu je provozovat nejintenzivnější laser na světě.

Číselně se jedná o laser s výkonem 10 PW (1 petawatt = 10^{15} W) při délce pulsu 130 fs, s frekvencí jeden puls za minutu a intenzitou 1024 W/cm^2 . Aktivní prostřední tvoří Nd:sklo. Jedním z hlavních cílů projektu je například urychlování částic laserem, výzkum jaderné fúze nebo zkoumání působení laseru na vakuum podle kvantové teorie.

2.4 Bezpečnost práce s lasery [3,24,44]

Laserová zařízení se dělí do čtyř bezpečnostních tříd, kde lasery I. třídy nejsou ani při delším pohledu škodlivé. Do II. třídy patří viditelné kontinuální záření. Oko se před poškozením chrání samo pomocí mrkacího reflexu. Třída III je obdobná jako třída II s tím rozdílem, že při pohledu na zdroj přes optickou soustavu už může dojít k poškození. Lasery IV. třídy mohou poškodit zrak i odraženým paprskem. Pro práci s lasery této třídy je nutno užití ochranných brýlí z organického skla s vrstvou, která je pro záření dané vlnové délky nepropustná. Citlivá je také pokožka, kterou je nutno chránit vhodným oděvem a rukavicemi. Všechny průmyslové lasery se řadí do IV. třídy, nicméně při splnění určitých podmínek se tyto lasery dají klasifikovat jako lasery I. třídy, konkrétně:

- integrování laseru do rámu stroje a zapouzdření vedení paprsku až k obráběcí hlavě
- ochrana před paprskem na laserové obráběcí hlavě
- ohraničení světelnými závorami, které jsou napojené na bezpečnostní okruh stroje
- uzavření pracovního prostoru kabinou (speciálním sklem / krytem)




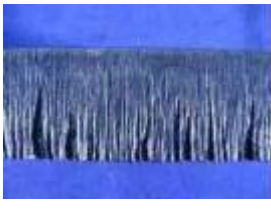
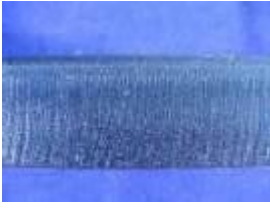
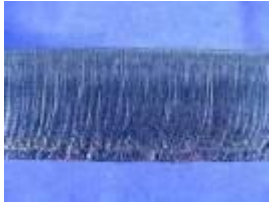



3. PARAMETRY A TECHNOLOGIČNOST ŘEZÁNÍ

Řezání laserem je technologie obecně náročná na správné nastavení. Vlna inovací, automatizace a zjednodušování posledních let však cestu za uspokojivě seřízeným procesem značně zjednodušila. V dnešní době se již parametry nenastavují ručně, ale zvolí se doporučené hodnoty pro konkrétní tloušťku a materiál přednastavené výrobcem (tzv. technologické tabulky). Moderní stroje navíc disponují sběrnicemi pro autooptimalizaci.

3.1 Parametry řezání [5,24,44,45,46,47]

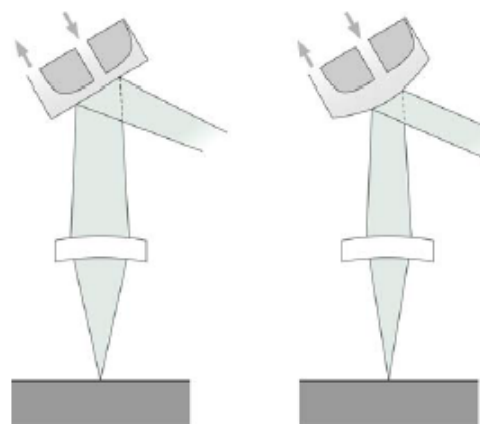
Do nastavitelných řezných parametrů laserem patří: výkon, rychlost řezu, tlak asistenčních plynů, poloha ohniska, mód (tvar) svazku, polarizace paprsku, ohnisková vzdálenost, velikost trysky, vzdálenost trysky od povrchu a další. Tyto parametry mají přímý vliv na kvalitu řezu, na které nás obvykle nejvíce zajímá drsnost povrchu. Tab. 3 zachycuje vliv některých z těchto parametrů na řeznou plochu.

Tab. 3 Vliv vybraných parametrů na vzhled řezané plochy [45]

	Nízké	Vhodné	Vysoké
Výkon			
Rychlost			
Ohnisko			

- ohnisko

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, moderní stroje mění své nastavení na základě hodnocení předešlých řezů. Změnu polohy ohniska zajišťuje adaptivní fokusační optika (viz obr. 21). Pod tímto názvem se u CO₂ laserů skrývá zrcátko, které se řízeným tlakem vody lehce vyboolí. Rozdíly se pohybují v řádech mikrometrů, což však způsobí posun ohniska až o 12 mm. U vláknových laserů se používá soustava dvou spojek a jedné rozptylky, které se vůči sobě pohybují. Tento konstrukční prvek umožňuje vyrovnávat nežádoucí posunutí polohy ohniska, vzniklé např. zahříváním optiky, a stejně tak držet konstantní polohu ohniska CO₂ laserů při pohybu v pracovním prostoru.



Obr. 21 Adaptivní zrcátko [24]

Ohnisko se většinou umísťuje k horní hraně řezaného plechu. Výjimkou jsou nerezky, kterým se ohnisko nastavuje přibližně do 2/3 jejich tloušťky a níž.

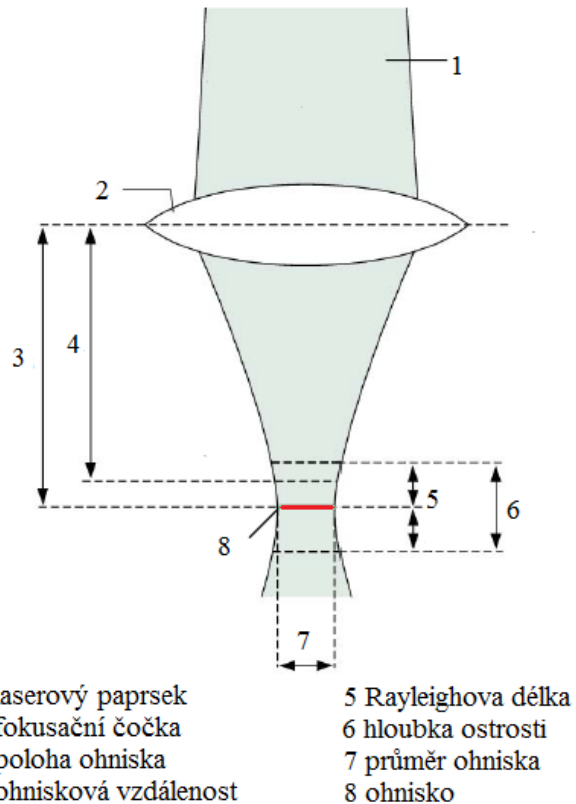
Jak je patrné z tabulky 3, správné nastavení vybraných parametrů přímo ovlivňuje vzhled řezu. V případě, že se technolog rozhodne nevyužít přednastavených technologických tabulek, musí postupovat metodou pokus – omyl, protože dané závislosti nejsou matematicky přesně popsány. Situaci navíc komplikuje fakt, že nastavitelných parametrů je hned několik a vzájemně se ovlivňují.

- ohnisková vzdálenost

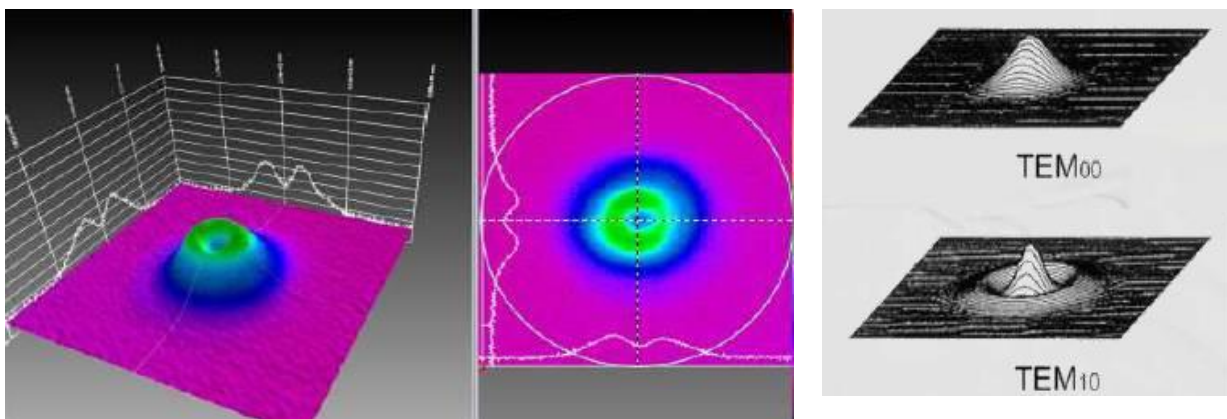
Tento parametr udává vzdálenost mezi středem čočky a ohniskem ideálního paprsku (obr. 22). Tímto parametrem je určen boční tvar fokusovaného svazku – čím je menší, tím více jde paprsek do tvaru písmene x. Čočky s malou ohniskovou vzdáleností (např. 3,5 palců) se používají pro menší tloušťky. Mají menší spotřebu plynů a dovolují vyšší rychlosti, než čočky s vyšší ohniskovou vzdáleností (např. 7,5 palců).

- mód paprsku

Mód paprsku znázorňuje rozložení energie v příčném směru a značí se symboly TEM_{xy} (transverse excitation mode), kde index x udává počet uzlů pole v příčném směru v ose x a index y udává počet uzlů ve směru osy y. Základní tvar je dán konstrukcí rezonátoru a nastavením zrcadel. Důležitá je co nejdokonalejší symetrie (viz obr. 23). TEM má při řezání vliv na velikost ohniska a tím i na intenzitu fokusovaného svazku. Pokud je špička hustoty energie mimo hlavní ohnisko, ohřívá materiál mimo řeznou spáru, čímž snižuje kvalitu řezu.



Obr. 22 Ohnisková vzdálenost [24]



Obr. 23 Symetrický TEM_{01} (vlevo a uprostřed), TEM_{00} a TEM_{10} (vpravo) [44]

Pro řezání je nejvýhodnější základní mód TEM_{00} , ve kterém je energie rozložena podle Gaussova rozdělení. Zajišťuje úzkou řeznou spáru a úzkou tepelně ovlivněnou oblast.

3.2 Technologičnost řezání ocelových plechů [47,50]

Jako každá technologie se i řezání laserem řídí několika zásadami, které je vhodné dodržovat. Tyto zásady v praxi uplatňuje programátor laseru, když pracuje v daném CAD/CAM systému, který se liší podle značky stroje. Pracovní postup programátora se skládá z těchto tří základních částí: příprava dílů, sestavení tabulí a vytvoření programu.

Požadované díly (výrobky) se v programu TruTops, používaném pro lasery značky TRUMPF, ve formátu .dxf buď naimportují, nebo nakreslí v integrovaném CAD systému.

U obrysů dílců se preferují zaoblené rohy (rádiusy) místo úhlů, protože každý roh znamená zpomalení. Průměr děr by měl být větší, než je tloušťka plechu. Samozřejmě lze vypálit i menší díru, ale pro zachování slušné kvality je vhodné pozměnit parametry. V rámci jednoho dílu se uplatňuje následující posloupnost: značení/gravírování, poté řezání vnitřních otvorů a nakonec vnější obrys. Při řezání je materiál z řezu strháván plynem do prostoru pod tabulí. Než dojde k propálení materiálu, tak (obzvláště u silnějších materiálů) se tavenina hromadí nad tabulí kolem zápalu a „díra“ kolem je mnohonásobně větší než je šířka řezu. Zápal slouží k tomu, aby místo průpalu nezasahovalo do dílu. Každý samostatný obrys je opatřen svým vlastním zápalem.

U malých dílců, u kterých hrozí, že po vyřezání propadnou roštem k odpadu, programátor nastaví tzv. mikromůstek. Laser pak při řezání vnějšího obrysu malý kousek nedořeže. Dílec se mikromůstkem drží zbytku tabule plechu a nevypadne. Zároveň je malý tak, aby ho obsluha bez větších problémů přelomila a dílec z plechu vyndala. Za účelem zvýšení produktivity lze použít metodu společných řezů, která spočívá v odstranění mezery spojením hran dvou stejných sousedících dílců (např. obdélníkové pásy).

K rozmístění součástí do plechu se dá využít buď automatická funkce, nebo se díly dají rozmísťovat „ručně“. Při vyplnění celého plechu stejnými součástkami je automat výhodný, ale při výrobě různých tvarů díly rozmísťuje dost neúspěšně a v takovém případě je vhodnější umísťovat ručně. Zvýší se využití plechu, ale zabere to čas programátora. V rámci tabule se dále řeší přejezdové časy mezi jednotlivými dílci. Samozřejmě je žádoucí, aby byly co nejmenší, ale obzvláště při řezání velkého počtu kusů vyšší tloušťky se kvůli rozložení tepla v plechu řeže postupně z různých stran plechu. Po vyplnění tabule se pro ni nastaví program, což v praxi znamená, že se vybere materiál a tloušťka plechu a program nabídne technologickou tabulku vytvořenou výrobcem programu nebo programátorem. Lze tedy říci, že celý proces mezi přijetím zakázky a řezáním dokáže být velmi svižný.

Během samotného řezu by měl operátor pokud možno sledovat pracovní prostor a být připraven pohotově proces přerušit. Může totiž nastat situace, že se plech, který byl smotán do svitku, vlivem zbytkových napětí (tvarové paměti) prohne směrem nahoru a hrozí kolize takto vyvýšeného dílce s tryskou. Moderní stroje jsou sice vybaveny čidly, které by takové kolizi měly zabránit, ale s ohledem na zastavení výroby či cenu případné opravy je vhodné dávat pozor. Tento jev je nejvíce patrný na dílech, které mají velké rozdíly v délce a šířce (tvar úzkého obdélníku apod.). Toto lze řešit přeorientováním dílce při tvorbě rezného plánu napříč směru vláken nebo použitím mikromůstků. Kromě klasických plechů, které jsou za studena či tepla válcovány na válcovacích tratích, se na trhu vyskytují i plechy určené speciálně pro laserové řezání. Konkrétně technologické postupy se různí – někteří výrobci plechy jen lépe proválcují, někteří výrobci, např. SAEY, plechy speciálně natahují, čímž odstraní zbytkové napětí po celé tloušťce a tím lze toto „zvedání“ dílců eliminovat. Takovéto plechy jsou příslibem kvalitnějšího řezání, ovšem za výrazně vyšší cenu.

Pozornost technologa plech vyžaduje ještě před započítáním řezání. Anomálie povrchu plechu je nutno odstranit (rez, nehomogenní okuje po válcování, popis křídou, škrábance). Z pohledu chemického složení je kritický křemík, jehož obsah by měl být ideálně do 0,03 % objemu. Křemík totiž reaguje s kyslíkem a přímo zhoršuje kvalitu rezné plochy.

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentu je zjistit nejvhodnější polohu ohniska, přičemž hlavním vyhodnocovacím kritériem je drsnost. V zadání experimentální části práce je zmíněna pouze požadovaná tloušťka plechu „až 20 mm“. Vzorky byly vyřezané laserem ve firmě STEELTEC CZ sídlící v Třinci, vzorek z plazmy vyhotovila firma R+W Ferra z Brna a vzorek řezaný vodním paprskem poskytla firma AWAC rovněž z Brna.

4.1 Vstupní informace [48,49]

- stroj

Vzorky řezané laserem byly zhotoveny na stroji TruLaser 3030 (L20) značky TRUMPF o maximálním výkonu 3200 W. Jedná se o CO₂ laser, který dokáže řezat konstrukční ocel do tloušťky 20 mm, a právě tato tloušťka na hranici možností stroje byla pro experiment zvolena. Vzorek řezaný plazmou byl zhotoven na stroji Kjellberg a vodním paprskem na stroji AquaCut.

- tvar vzorku

Tvar vzorku (obr. 24) byl zvolen téměř náhodně – pouze tak, aby se pohodlně vešel do zbytků plechů, které se ve firmě STEELTEC nacházely. Byl zvolen čtverec o rozměrech 50x50 mm s dírou o průměru stejném jako je tloušťka plechu, tedy 20 mm. Jak bylo zmíněno v kapitole 3.2, laser nedokáže vyřezat rohy, a proto bylo rozhodnuto na součásti dva ostré rohy zkusit. Zbylé dva rohy jsou zaobleny na R5 a R2.

- materiál

Všechny vzorky byly vyřezány z plechu S235JR (podle staré ČSN 11 375). Jde o konstrukční ocel vhodnou ke svařování. Tento materiál byl zvolen, protože většina zakázek firmy se reže právě z této oceli.

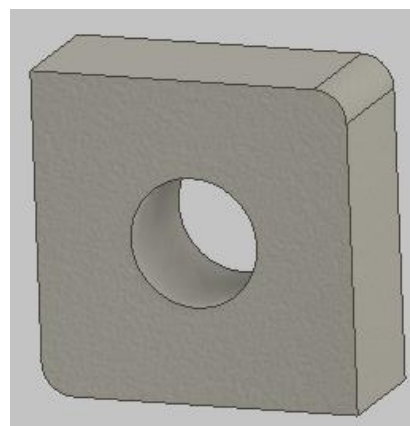
- technologické parametry (laser)

Řezné parametry byly přejaty z technologického listu doporučeného výrobcem (tab. 4) – kromě polohy ohniska, kterým bylo pohybováno změnou hodnoty parametru FocusLine. Výchozí hodnota byla 3,5 mm a v rámci experimentu byla měněna v intervalu 1,5 až 7,5 mm vždy po jednom milimetru. Vnější čtvercový obrys spadá do třídy velký obrys, zatímco díra spadá mezi střední obrysy, a proto se řídila jinou technologickou tabulkou. Výchozí hodnotou FocusLine pro díru bylo 3,0 mm, tedy o 0,5 mm méně než vnější obrys. V rámci zachování tohoto vztahu byla i tato hodnota FocusLine měněna vždy o 1 mm, tedy od 1,0 do 7,0 mm. Pro řezání oblouků stroj využívá tzv. redukované parametry.

Tab. 4 Nastavené řezné parametry

	<i>Normálně</i>	<i>Redukovaně</i>		
<i>Výkon laseru</i>	2600 W	2600 W	<i>Čočka</i>	250 mm
<i>Spínací frekvence</i>	20000 Hz	20000 Hz	<i>Tryska</i>	EAA20
<i>Rychlost</i>	0,600 m/min	0,400 m/min		
<i>Vzdálenost trysky</i>	1,00 mm	2,00 mm		
<i>Tlak plynu</i>	0,60 bar	0,60 bar		

Drsnost byla zkoumána pouze na vnější ploše, takže fakt, že zaoblené rohy a díra byly řezány jinými parametry, není podstatný. Jako řezný plyn byl použit kyslík. Doba každého z řezů laserem byla 36 sekund, z toho 12 sekund zabralo vytvoření zápalů.



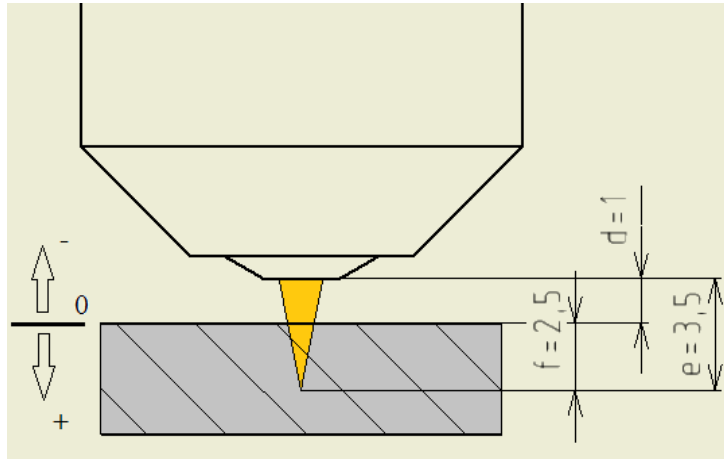
Obr. 24 Tvar vzorku

4.2 Poloha ohniska

Nastavovaný parametr FocusLine se vztahuje k vrcholu trysky. To je pro účel této práce nepraktické, proto byl zaveden jednoosý souřadný systém s počátkem na horní hraně řezaného plechu (viz obr. 25). Vzdálenost ohniska od horního okraje plechu se pak zjistí jednoduchým přepočtem 4.2.1:

$$f = e - d \quad (4.1.1)$$

kde f je vzdálenost ohniska od horního okraje plechu v mm
 e je hodnota nastavovaného parametru FocusLine v mm
 d je výška trysky nad plechem; zde vždy 1 mm



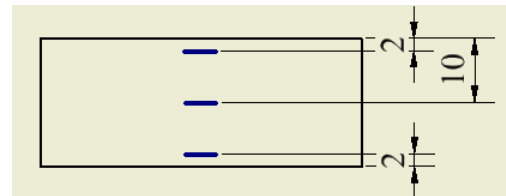
Obr. 25 Znárodnění polohy ohniska pro FocusLine = 3,5 mm

Z obr. 25 vyplývá, že při hodnotě FocusLine 3,5 mm se ohnisko nachází 2,5 mm pod horním okrajem plechu.

4.3 Vyhodnocení vzorků

Drsnost byla měřena školním přenosným drsnoměrem, který bohužel dokáže měřit na poměrně malé délce 2,5 mm. Střední aritmetická úchylka profilu R_a a největší výška profilu R_z byla měřena ve třech místech – 2 mm pod horní hranou, 10 mm pod horní hranou a 2 mm nad spodní hranou (viz obr. 26). Hodnoty R_a některých vzorků naměřené „uprostřed“ vykazovaly značný rozptyl, proto bylo provedeno několik opakovaných měření a z naměřených hodnot vytvořen aritmetický průměr.

Snímky byly pořízeny na klasickém optickém mikroskopu, pouze vzorky 1, 3 a 4 byly zkoumány ještě na digitálním mikroskopu Keyence VHX 5000 (obr. 27).



Obr. 26 Měřená místa

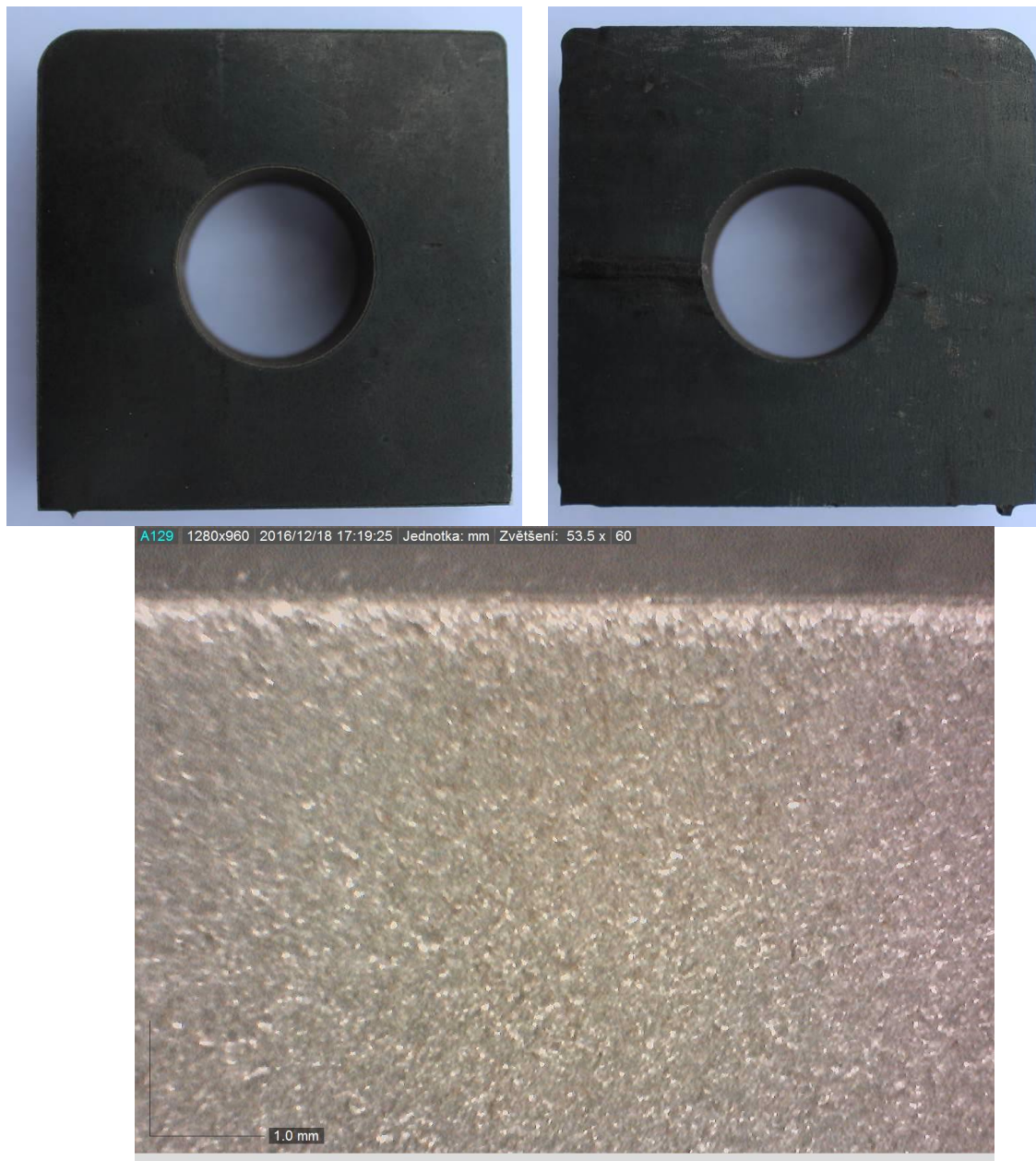


Obr. 27 Keyence VHX 5000

- voda vzorek 0
- technologie: vodní paprsek
čas: 8 minut
cena: 240 Kč

Tab. 5 Naměřené drsnosti 0

	Ra (μm)	Rz (μm)
Vrchní hrana	4,09	25,5
Střed	4,23	26,07
Spodní hrana	3,83	30,0
Průměr	4,05	27,19



Obr. 28 Vzorek 0 (vodní paprsek)

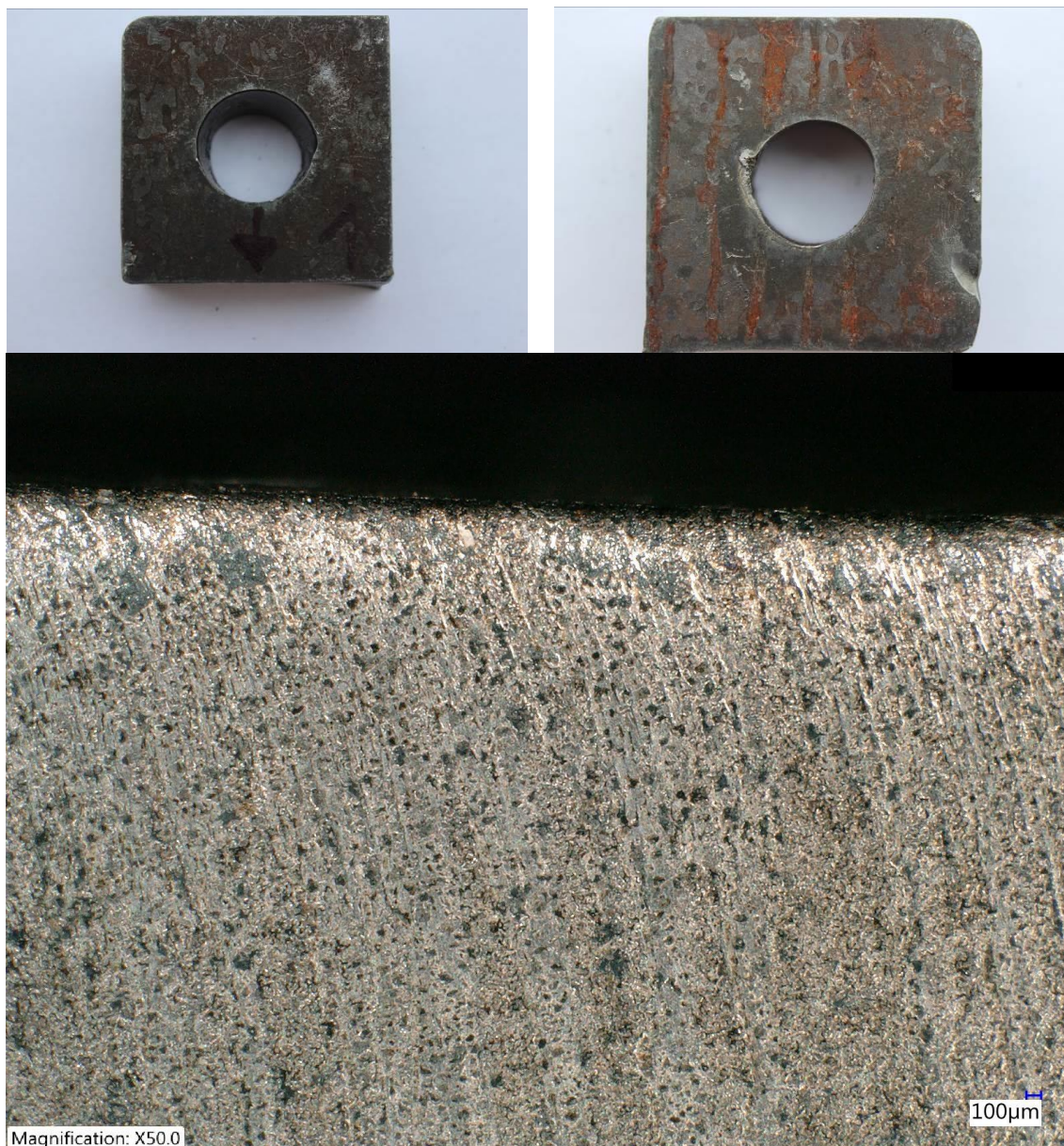
Horní plocha na pohled zcela bez závad. Poloměry i ostré rohy vyřezány bez problémů. Řezná plocha čistá, bez jakýchkoliv vln. Při pohledu zespodu lze vidět, že v některých místech se materiál „vytrhl“ a tím se vytvořily plytké nedokonalosti. Největší vadou tohoto vzorku je zbytek po technologickém můstku. Firmě AWAC, ve které byl vzorek zhotoven, byl zadán požadavek na Ra v intervalu 3 až 10 μm , aby se dalo porovnat cenu a čas se vzorky z plazmy a laseru. Výsledná naměřená drsnost byla velmi nízká. Správným zvýšením rychlosti řezu by se čas řezu zkrátil a kvůli menší spotřebě abraziva by byl i levnější, zatímco drsnost by se udržela v požadovaném rozmezí.

- vzorek 1

technologie: plazma
čas: 60 sekund
cena: 61,80 Kč

Tab. 6 Naměřené drsnosti 1

	Ra (μm)	Rz (μm)
Vrchní hrana	1,21	6,8
Střed	1,25	6,6
Spodní hrana	2,62	11,8
Průměr	1,69	8,4



Obr. 29 Vzorek 1 (plazma)

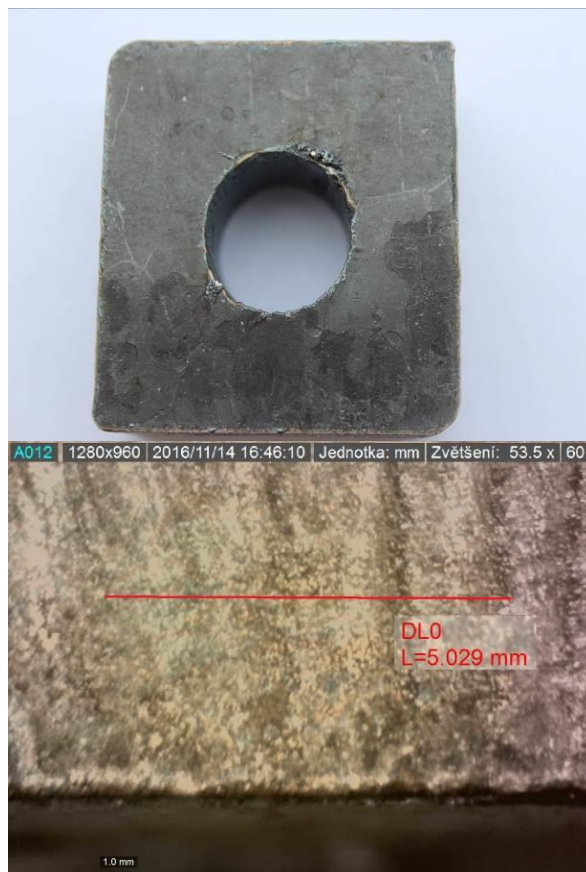
Vzorek řezaný plazmou byl postižen viditelným úkosem – zejména pravý dolní roh a díra. Kruhovitost díry velmi špatná, na spodní hraně díry zůstala přilepená struska. Ostrý roh vytvořen velmi dobře. Na řezné ploše byly pod mikroskopem vidět vlny pouze minimální. Naměřená drsnost byla o řád lepší než u vzorků z laseru. Oproti tomu cena i čas řezu uvedené firmou R+W Ferra byly v porovnání s výpalky laserem výrazně vyšší, což je ale částečně způsobeno tím, že tato firma k dílcům nastavuje větší okraje (10 mm na každou stranu) než firma, která vyhotovila vzorky řezané laserem.

- vzorek 2

technologie: laser
čas: 36 sekund
cena: 26,38 Kč
FocusLine: 1,5 mm

Tab. 7 Naměřené drsnosti 2

	Ra (μm)	Rz (μm)
Vrchní hrana	11,66	54,6
Střed	3,97	24,4
Spodní hrana	12,19	48,7
Průměr	9,27	42,6



Obr. 30 Vzorek 2 (laser)

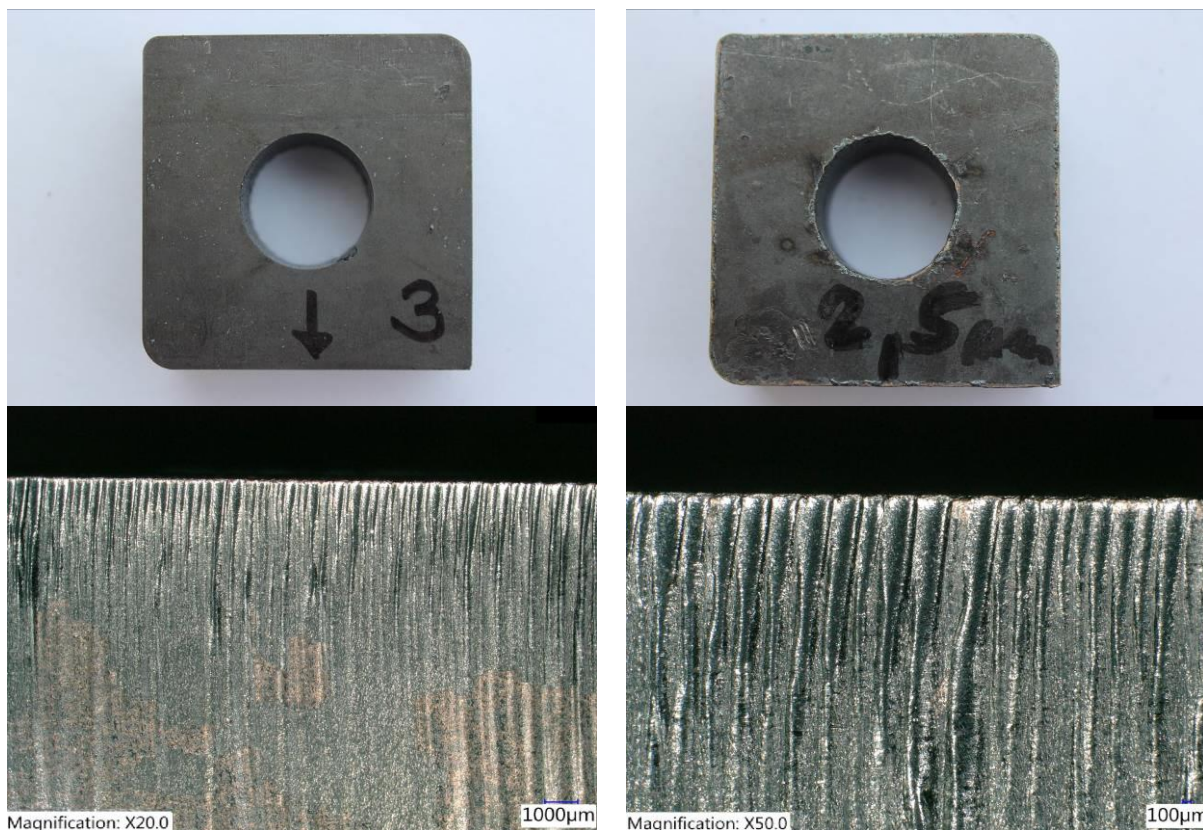
Řezné plochy na pohled dobré, lepší než u referenčního vzorku 4 s ohniskem nastaveným od výrobce na 2,5 mm. Kruhovitost díry dobrá, ale na spodní hraně s větším množstvím strusky. Ostré rohy se podle očekávání nepovedlo vytvořit. V levém horním rohu je viditelné, že plánovaný ostrý roh se utavil. Pravý dolní „ostrý“ roh se dokonce jeví jako zaoblení. Na červeně vyznačené délce 5 mm na horní hraně bylo napočítáno 21 vln. Na spodní hraně se vlny nevyskytovaly. Průměrná drsnost (Ra i Rz) tohoto vzorku vyšla ze všech vzorků řezaných laserem nejlépe.

- vzorek 3

technologie: laser
čas: 36 sekund
cena: 26,38 Kč
FocusLine: 2,5 mm

Tab. 8 Naměřené drsnosti 3

	Ra (μm)	Rz (μm)
Vrchní hrana	10,74	51,4
Střed	4,18	26,4
Spodní hrana	14,46	53,4
Průměr	9,79	43,7



Obr. 31 Vzorek 3 (laser)

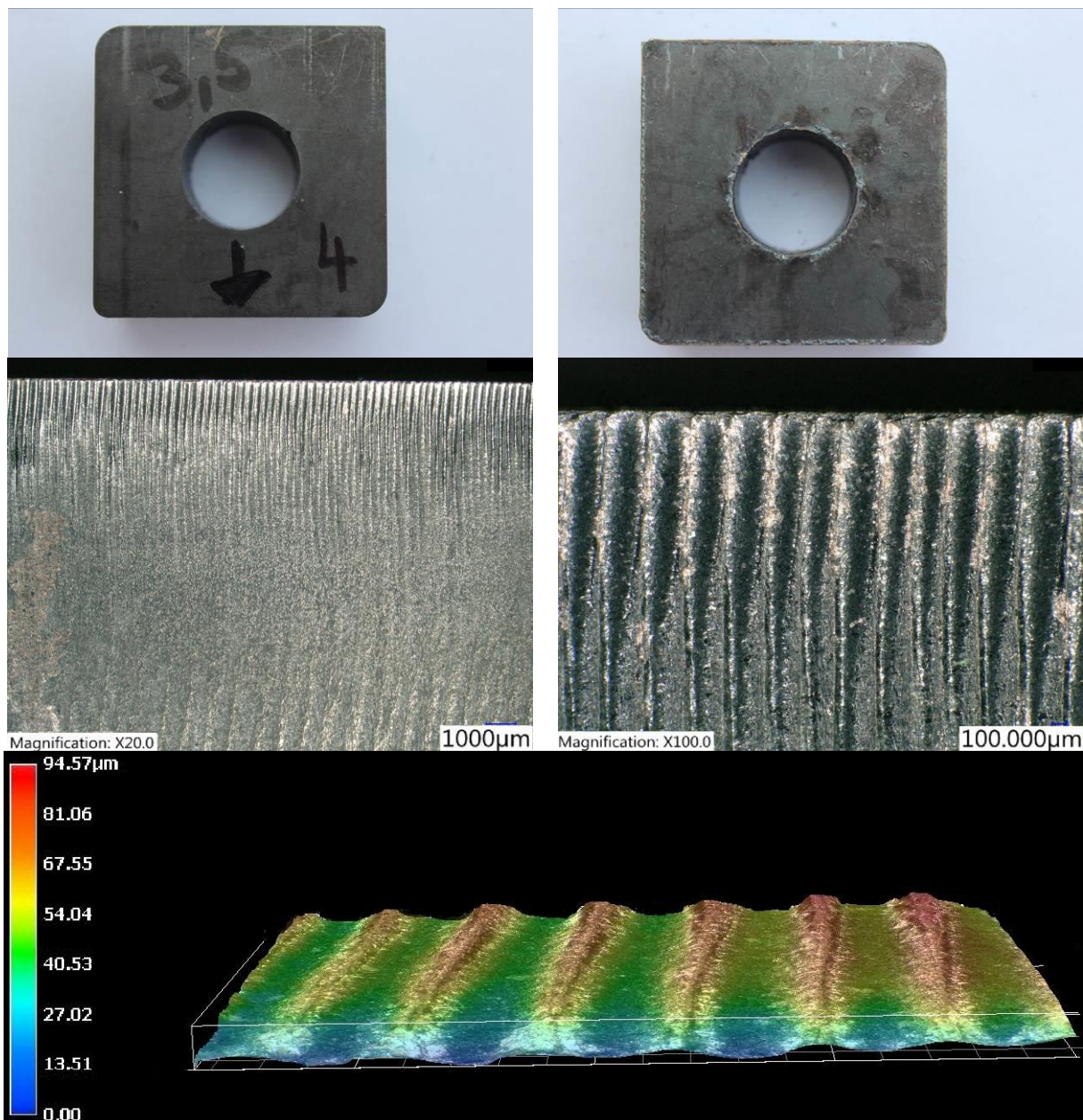
Prostým okem se vzorek 3 jevil jako nejlepší. Obrys z horní strany čistý, díra kruhovitá, plochy na dotyk hladké. Spodní strana je postižena usazenou struskou, které je znatelně více, než na vzorku 2, ale srovnatelně s referenčním vzorkem 4. Ostré rohy i díra dopadly téměř stejně jako u vzorků 2 a 4. Na měřené délce 5 mm bylo napočítáno 22 vln. Drsnost naměřená na vrchní hraně tohoto vzorku byla ze všech laserových vzorků nejmenší, ale ve zbylých dvou místech byla drsnost horší než u vzorku 2 a na spodní hrana byla dokonce horší než u vzorků 4 a 5. Aritmetický průměr drsností však řadí tento vzorek těsně na druhé místo.

- vzorek 4 – referenční

technologie: laser
čas: 36 sekund
cena: 26,38 Kč
FocusLine: 3,5 mm

Tab. 9 Naměřené drsnosti 4

	Ra (μm)	Rz (μm)
Vrchní hrana	15,14	65,2
Střed	7,61	44,5
Spodní hrana	12,60	52,8
Průměr	11,78	54,2



Obr. 32 Vzorek 4 (laser)

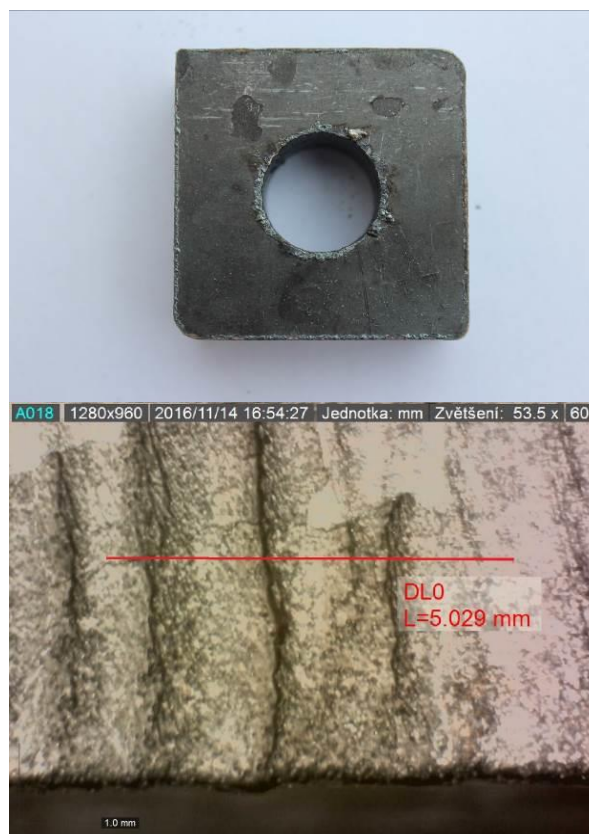
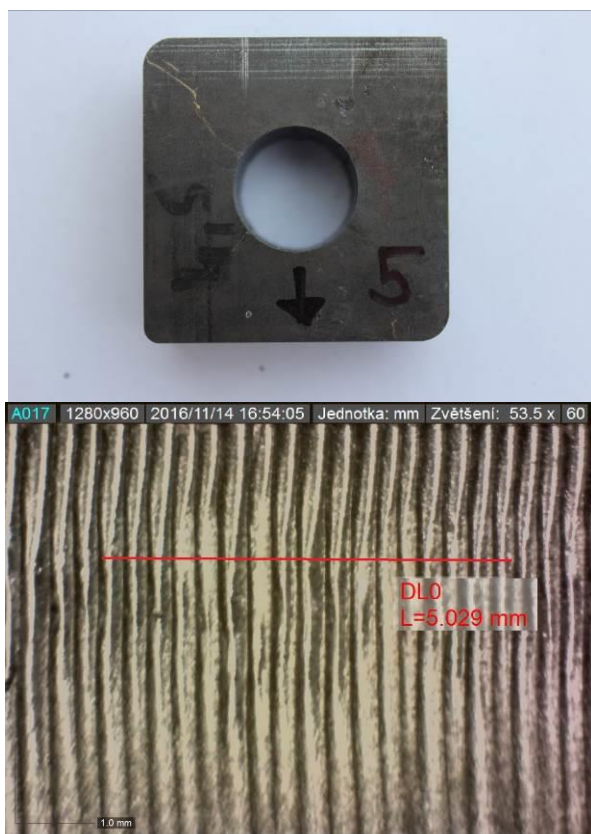
Vzorek 4 s ohniskem 2,5 mm pod horní hranou plechu je referenčním vzorkem tohoto experimentu - tedy vzorkem, který byl zhotoven podle výchozího nastavení výrobce stroje. Geometrie a kvalita je obdobná jako u vzorku 2 a 3. Naměřená drsnost zdatelně odskočila od předchozích dvou vzorků. Na délce 5 mm na u horní hrany bylo spočteno 21 vln. Topografické znázornění povrchu z digitálního mikroskopu VHX 5000 bylo pořízeno v rozdílné vzdálenosti od horní hrany než bylo provedeno měření drsnoměrem, a proto nebylo dosaženo shodných výsledků.

- vzorek 5

technologie: laser
čas: 36 sekund
cena: 26,38 Kč
FocusLine: 4,5 mm

Tab. 10 Naměřené drsnosti 5

	Ra (μm)	Rz (μm)
Vrchní hrana	19,77	65,8
Střed	5,97	38,4
Spodní hrana	12,85	47,7
Průměr	12,86	50,6



Obr. 33 Vzorek 5 (laser)

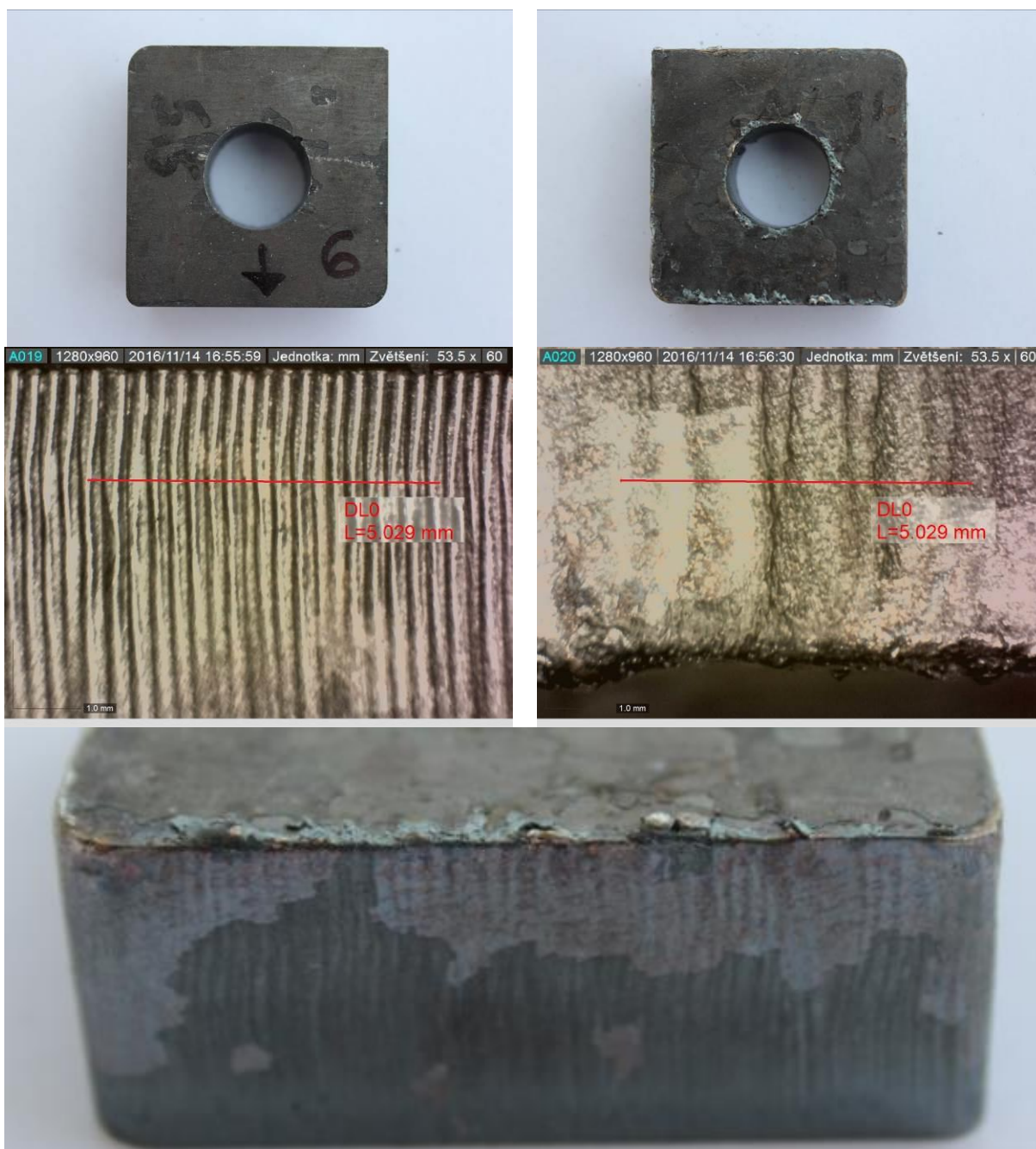
Vnější obrys dobrý, srovnatelný s předešlými vzorky. Díra z horní strany překvapivě nejlepší – jako jediná bez viditelného poškození zápalem. Ze spodní strany však ulpělo příliš velké množství strusky o již nezanedbatelné výšce. Řezná plocha u horní i spodní hrany pokračuje v trendu hrubnutí. Na kontrolované délce bylo 17 vln. U spodní hrany lze pozorovat, že s klesajícím ohniskem se výskyt zpravidelňuje „jizev“. Drsnost na středě byla lepší a na spodní hraně srovnatelná s referenčním vzorkem 4. Oproti tomu Ra na horní hraně už vykazuje dvojnásobek drsnosti vzorku 3 a je tak nejvyšší naměřenou hodnotou ze všech laserových vzorků.

- vzorek 6

technologie: laser
čas: 36 sekund
cena: 26,38 Kč
FocusLine: 5,5 mm

Tab. 11 Naměřené drsnosti 6

	Ra (μm)	Rz (μm)
Vrchní hrana	18,27	64,9
Střed	6,55	44,4
Spodní hrana	15,32	59,3
Průměr	13,38	56,2

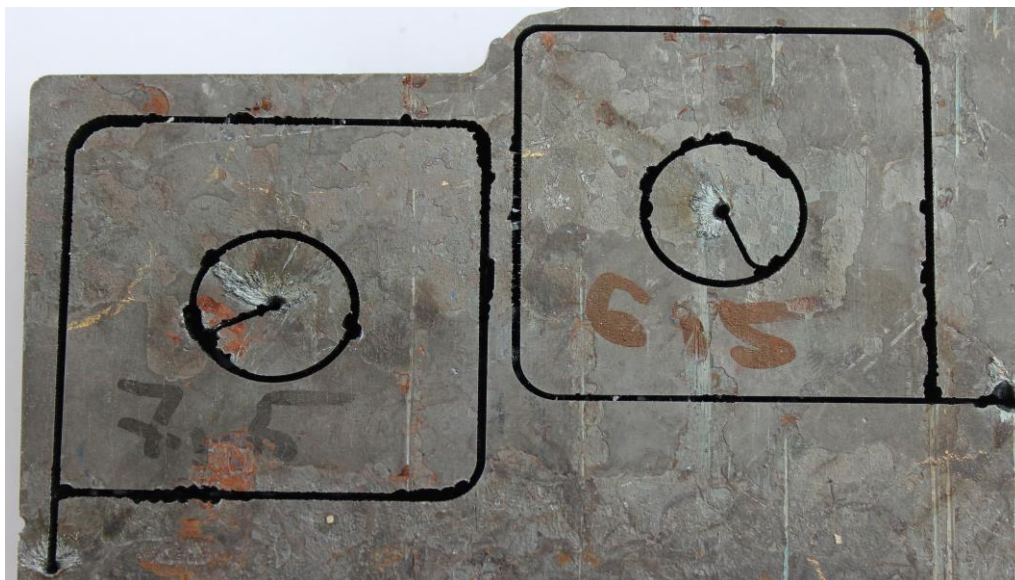


Obr. 34 Vzorek 6 (laser)

Vnější obrys stále dobrý, ale vnitřní obrys díry viditelně zasažen zápalom. Okraje spodní hrany oblepeny struskou o výšce až 1 mm. Na vyznačené délce napočítáno 19 vln. Průměrná drsnost je nejhorší ze všech měřených vzorků.

- vzorek 7 a 8

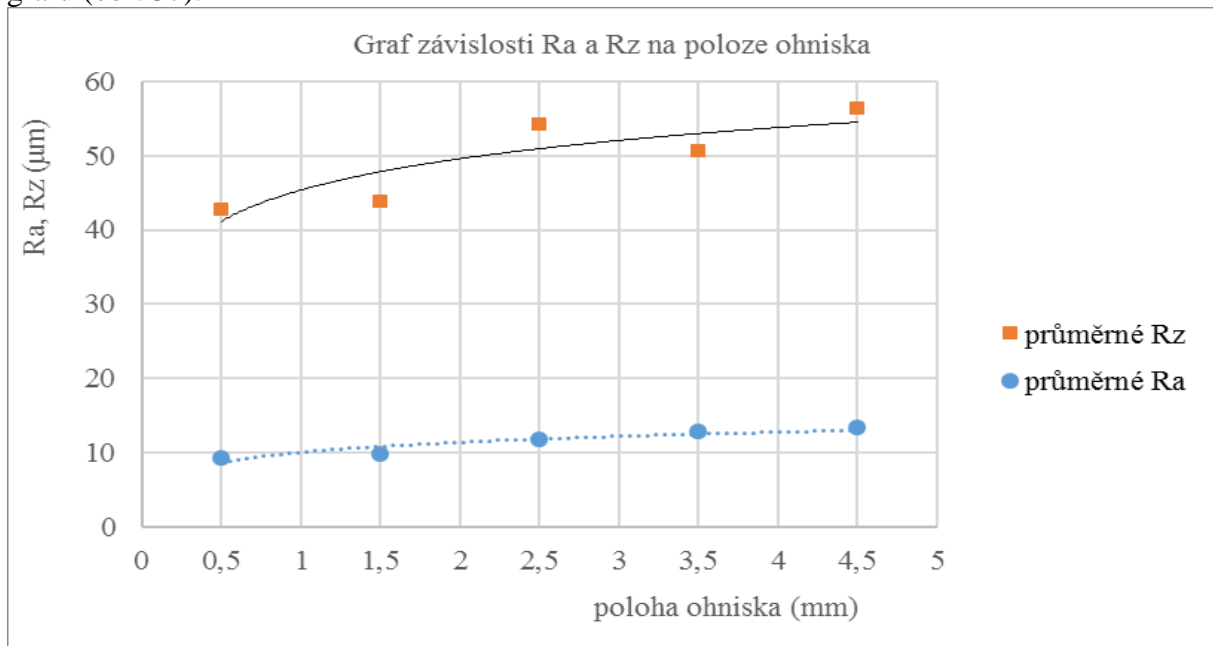
technologie: laser
čas: 36 sekund
cena: 26,38 Kč
FocusLine: 6,5 a 7,5 mm



Obr. 36 Vzorek 7 a 8 (laser)

Vzorky 7 a 8 se v podstatě přivařily ke zbytku plechu. Na horní hraně se vyskytuje tzv. hrubý řez. Při porovnání obou vzorků lze vidět, že množství i výška strusky na spodní straně rostly s klesající polohou ohniska.

Pro názornější zobrazení výsledků měření jsou drsnosti vzorků řezaných laserem vyneseny do grafu (obr. 37).



Obr. 37 Graf závislosti Ra a Rz na poloze ohniska

Z grafu vyplývá, že nejmenší naměřené drsnosti bylo dosaženo při nastavení ohniska 0,5 mm pod horní hranu plechu, což odpovídá hodnotě parametru FocusLine 1,5 mm (vzorek 2), a s postupným posouváním ohniska blíže ke spodní hraně drsnost vrůstala.

5. ZÁVĚRY

Technologie řezání laserem je významnou a velmi rozšířenou metodou dělení ocelových plechů. Oproti jiným technologiím (plazma, kyslík, vodní paprsek) má své výhody, ale samozřejmě i nevýhody. Obecně nelze žádnou z popsanych technologií prohlásit za univerzálně nejlepší a vhodnost každé z nich je nutné posuzovat na základě konkrétního dílce, případně celkové povaze výroby, přičemž hlavními faktory mohou být například tloušťka plechu, požadovaná drsnost či velikost výrobní série.

Jakákoliv laserová technologie je fyzikálně relativně složitý proces, ale od svého objevení se jej podařilo probádat natolik, že se v současnosti uplatňuje v široké škále oborů a laser se stal součástí každodenního života. Z hlediska dělení materiálů byl v posledních letech největším pokrokem objev a vývoj vláknových laserů, které dnes pomalu vytlačují starší lasery s jinými typy aktivního prostředí.

V experimentální části, která byla provedena převážně ve firmě STEELTEC CZ na CO₂ laseru TRUMPF s výkonem 3 200 W, bylo za úkol provést optimalizaci řezání ocelového plechu o tloušťce 20 mm pomocí změny polohy ohniska. Vyhodnocovaným parametrem byla zvolena drsnost (Ra, Rz) a celkový vzhled vzorku. Celkem bylo provedeno 7 řezů laserem a ohnisko bylo umísťováno v intervalu od 0,5 mm po 6,5 mm pod horní hranou plechu. Výrobce laseru pro materiál dané tloušťky přednastavil ohnisko 2,5 mm pod horní okraj. V experimentu bylo zjištěno, že ještě lepší drsnosti bylo dosaženo při posunutí ohniska směrem nahoru. Naopak posun dolů znamená zhoršení kvality řezné plochy i vizuálního stavu a od určité hodnoty dokonce k řezu vůbec nedojde. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při poloze ohniska 0,5 mm pod horní hranou (vzorek 2), kde byla drsnost v porovnání s referenčním vzorkem (vzorek 4) nižší o 22 %. Dá se tedy říci, že optimalizace proběhla úspěšně.

Jako reakce na nejasný verdikt literární rešerše o kladech a záporech jednotlivých technologií byl proveden ještě řez stejného vzorku pomocí plazmy ve firmě R+W Ferra a další pomocí vodního paprsku ve firmě AWAC. Z hlediska drsnosti byl vzorek řezaný plazmou o řád lepší než vzorky řezané laserem. Oproti tomu tvar vnitřního i vnějšího obrysu byl o mnoho horší. Samotný řez pak byl pomalejší a dražší, což bylo částečně způsobeno tím, že firma R+W Ferra svým dílcům nastavuje o 3 mm větší technologické okraje než firma STEELTEC CZ. Vzorek řezaný vodním paprskem byl vizuálně jasně nejlepší. Naopak čas řezu i cena byla s laserem i plazmou nesrovnatelně vyšší. Obojí by však šlo snížit na úkor drsnosti, která byla na daném vzorku jen o málo vyšší než drsnost vzorku řezaného plazmou.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ENGST, Pavel a Milan HORÁK. *Aplikace laserů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Populární přednášky o fyzice.
2. KUBÁTOVÁ, Jitka a Ivo LUKEŠ. *Laserové technologie opracování kovových materiálů*. Dobrá u Frýdku-Místku: Výzkumný ústav hutnictví železa, 1988. Hutnické aktuality (Výzkumný ústav hutnictví železa). ISSN 0322-8252.
3. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
4. Laser_horni_lista. In: KOVO Fůkal [online]. 2012 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.kovofukal.cz/sluzby/cnc-rezani-laserem.html>
5. MINAŘÍK, Václav. *Tepelné dělení materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-01-01028-7.
6. KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování: celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986
7. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
8. VZDĚLÁVACÍ CENTRUM SPOLEČNOSTI ESAB: Jak nejlépe řezat ocelové plechy. *ESAB* [online]. 2013 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/cz/cz/education/blog/what-is-the-best-way-to-cut-steel-plate.cfm>
9. *Oxyfuel cutting - process and fuel gases* [online]. 2000 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/oxyfuel-cutting-process-and-fuel-gases-049/>
10. *KRITÉRIA VOLBY METODY A TRENDY TEPELNÉHO DĚLENÍ MATERIÁLŮ* [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/roubicek49122.pdf>
11. *Autogen, řezání plamenem, řezání autogenem, řezací hořáky* [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/autogen>
12. BŘICHNÁČ, Pavel. Plazmové technologie: Ostatní využití plazmatu. *Aldebaran* [online]. AGA & Štefánikova hvězdárna v Praze, 2004, 2(20) [cit. 2017-02-11]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_20_plt.php
13. Nové technologie obloukového svařování a dělení plazmou. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2006, 2006(4), 30 [cit. 2017-02-11]. DOI: 060416. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-technologie-obloukoveho-svarovani-a-deleni-plazmou.html>
14. Řezání vodním paprskem: Řezání čistou vodou. *Bystronic* [online]. [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: http://www.bystronic.cz/cs/produkty/systemy_rezani_vodnim_paprskem/
15. KRAJNÝ, Zdenko. Vodný lúč v praxi WJM. 1. Vydanie, Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998, 214 s. ISBN 80-8057-091-4
16. DVOŘÁK, J.: Integrita rozhraní materiálů 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.
17. KOŘÁN, Pavel. *SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (LASER CUTTING)*. In: *Lasery a Optika* [online]. 2013 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z:

- <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
18. PLAZMACZ: *Plazma přednosti a nevýhody* [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.plazmacz.cz/plazma-prednosti-a-nevyhody/>
 19. LU, Xizhao, Haihe XIE, Chun LIN a Yuanqing HUANG. The Enhanced Measurements of Laser Micro-jet Processing. *Journal of Modern Physics* [online]. 2011, **02**(03), 109-112 [cit. 2017-02-12]. DOI: 10.4236/jmp.2011.23017. ISSN 2153-1196. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/jmp.2011.23017>
 20. *The Laser MicroJet® Technology* [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.synova.ch/technology/laser-microjet.html>
 21. *LASER MICROJET (LMJ)* [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://terhoek.com/en/processes/3d-shapes/laser-microjet-lmj/>
 22. TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvárania*. Bratislava: Alfa, 1989. Edícia strojárскеj literatúry (Alfa). ISBN 80-05-00097-9.
 23. KUČERA, Jan. Teorie svařování - část 2. Ostrava: VŠB, 1994, 207-402 s.
 24. TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH + CO. KG. *Technická informace: Obrábění laserem, CO2 laser*. 09. TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co., 2009.
 25. CO2 nebo pevnolátkový laser? Vaše volba. TRUMPF Česká republika [online]. [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-2d-laserem/co2-nebo-pevnolatkovy.html>
 26. KOŘÁN, Pavel. *SERIÁL NA TÉMA LASERY - HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU* [online]. 2013 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
 27. DUŠEK, Jiří. *Hlavní typy laserů používaných v průmyslu* [online]. 2013 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
 28. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, (3), 80 [cit. 2017-02-19]. DOI: 080304. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
 29. LUKÁŠ, Michal. *Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. Laserové diody Část 1 - Princip funkce laserových diod* [online]. 2001, (3), s. 80 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
 30. KAŠPAR, Jan. *Plyny – neviditelné tajemství zpracování materiálu laserem. Technik* [online]. 2006 [cit. 2017-02-19]. DOI: 22_23_TE09.indd. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/plyny-neviditelne-tajemstvi-zpracovani-materialu-laserem_18781.html
 31. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. In: *Portál moderní fyziky* [online]. Univerzita Palackého v Olomouci, 2010 [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
 32. KLOCZKOWSKI, Robert. *Upgrading your laser cutting equipment. THE TUBE & PIPE JOURNAL* [online]. 2010 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/article/lasercutting/upgrading-your-laser-cutting-equipment>

33. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění – 4. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, **2008**(3), 80 [cit. 2017-02-27]. DOI: 080304. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenčni-metody-obrabeni-4-dil.html>
34. Průmyslové lasery s ultrakrátkými pulzy k závěru roku 2011. *Technický portál* [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/prumyslove-lasery-s-ultrakratkymi-pulzy-k-zaveru-roku-2011_18162.html
35. LASEROVÉ VRTÁNÍ. *Lasery a Optika* [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-vrtani-92>
36. Micro-hole drilling and cutting using femtosecond fiber laser. *Optical Engineering* [online]. 2014, **53**(5), 051513- [cit. 2017-02-27]. DOI: 10.1117/1.OE.53.5.051513. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.OE.53.5.051513>
37. Kvalita a cena. *CHPS s.r.o* [online]. [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/rezani-laserem/kvalita-a-cena>
38. BENKO, Bernard. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
39. SCHUBERT, Steffan. Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. **2011**(7), 60 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>
40. HROMADA, Martin. Povrchové kalení ocelí vláknovým YbYAG laserem. Brno, 2013. 56s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
41. *Laserové kalení* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/obrabeni-povrchu/laserove-kaleni.html>
42. *Špičkové laserové centrum pro nové vědecké objevy: Leták - vysoké školy* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: https://www.ei-beams.eu/media/filer_public/3b/bd/3bbd4f84-8d02-48c8-996c-0f4123b240cd/letak-vysoke-skoly.pdf
43. BETKA, Jan. *Novinky v medicíně: Principy CO2 laseru a jeho využití v chirurgii*. 1. Praha: Avicenum, Praha. ISBN 80-201-0096-2.
44. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [online]. VUT Brno : Odbor technologie svařování a povrchových úprav - studijní opory [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techniky_2013__mrna.pdf
45. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser* [online]. VUT Brno : Odbor technologie svařování a povrchových úprav - studijní opory [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani_laserem_2013__mrna.pdf
46. MEŠKO, Jozef, Rastislav NIGROVIČ a Andrej ZRAK. Vplyv vybraných technologických parametrov laserového rezania na drsnosť reznej plochy ocele S235JR. *ZVARANIE*. **2016**(3-4), 59-62.

47. SCHULZ, Jan. *Re: Řezání laserem* [e-mailová komunikace]. 12. 1. -16. 2. 2017. [cit. 2017-03-05].
48. Laserové stroje TruLaser: TruLaser 3030 / 3040. *TRUMPF* [online]. [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-2d-laserem/laserova-rezaci-zarizeni/trulaser-3030-3040.html>
49. FÜRBAKER, Ivan, Karel MACEK a Josef STEIDL. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity. Svazek 1*. Praha: Dashöfer, 2001, 1 sv. (na volných listech). ISBN 8086229025.
50. *SAEY steel* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.saeysteel.com/en/stretch/index.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
d	výška trysky nad plechem	[mm]
e	hodnota nastavovaného parametru FocusLine	[mm]
E1	základní stav, stabilní hladina	[-]
E2	excitovaný (vybuzený) stav, nestabilní hladina	[-]
f	vzdálenost ohniska od horního okraje plechu	[mm]
f_{12}	frekvence kmitání odpovídající přechodu E ₁ až E ₂	[Hz]
h	Planckova konstanta	[J.s]
Ra	střední aritmetická úchylka profilu	[μ m]
Rz	výška nerovnosti profilu	[μ m]
TEM	transverse excitation mode	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Řezání laserem	9
Obr. 2 Schéma řezání kyslíkem	10
Obr. 3 Strojní řezání kyslíkem	11
Obr. 4 Ruční řezání kyslíkem	11
Obr. 5 Schéma řezání plazmou	11
Obr. 6. Řezání čistým vodním paprskem	12
Obr. 7 Schéma zařízení technologie AWJ	13
Obr. 8. Schéma řezání laserem	13
Obr. 9 Graf závislosti řezných rychlostí na tloušťce plechu nelegované oceli	15
Obr. 10 Schéma LMJ	15
Obr. 11 Schéma základních procesů v laseru	17
Obr. 12 Princip rubínového laseru	18
Obr. 13 Geometrie aktivního prostředí	18
Obr. 14 Schéma vláknového laseru [27]	19
Obr. 15 Princip plynového laseru	20
Obr. 16 Skládání rezonátor a radiální turbodmychadlo	21
Obr. 17. Difuzně chlazený laser (slab)	22
Obr. 18 Dusík x kyslík	23
Obr. 19 Využití laseru ve strojírenství	23
Obr. 20 Laserem vrtaná díra	24
Obr. 21 Adaptivní zrcátko	26
Obr. 22 Ohnisková vzdálenost	27
Obr. 23 Symetrický TEM ₀₁ (vlevo a uprostřed), TEM ₀₀ a TEM ₁₀ (vpravo)	27
Obr. 24 Tvar vzorku	29
Obr. 25 Znázornění polohy ohniska pro FocusLine = 3,5 mm	30
Obr. 26 Měřená místa	30
Obr. 27 Keyence VHX 5000	30
Obr. 28 Vzorek 0 (vodní paprsek)	31
Obr. 29 Vzorek 1 (plazma)	32
Obr. 30 Vzorek 2 (laser)	33
Obr. 31 Vzorek 3 (laser)	34
Obr. 32 Vzorek 4 (laser)	35
Obr. 33 Vzorek 5 (laser)	36
Obr. 34 Vzorek 6 (laser)	37
Obr. 36 Vzorek 7 a 8 (laser)	38
Obr. 37 Graf závislosti Ra a Rz na poloze ohniska	39

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Klady, zápory a vhodnost využití jednotlivých technologií	14
Tab. 2 Přehled parametrů základních laserů	19
Tab. 3 Vliv vybraných parametrů na vzhled řezané plochy	26
Tab. 4 Nastavené řezné parametry	29
Tab. 5 Naměřené drsnosti 0	31
Tab. 6 Naměřené drsnosti 1	32
Tab. 7 Naměřené drsnosti 2	33
Tab. 8 Naměřené drsnosti 3	34
Tab. 9 Naměřené drsnosti 4	35
Tab. 10 Naměřené drsnosti 5	36
Tab. 11 Naměřené drsnosti 6	37