



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Porovnání laserového a plasmového
dělení plechových polotovarů**

**Comparation of laser and plasma
cutting of sheet metal blanks**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

Jiří PUDIL

Studijní program: B2343 VÝROBA A EKONOMIKA VE
STROJÍRENSTVÍ

Studijní obor: 2303R014 TECHNOLOGIE, MATERIÁLY A
EKONOMIKA VE STROJÍRENSTVÍ

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pelikán

**POROVNÁNÍ LASEROVÉHO A PLASMOVÉHO DĚLENÍ PLECHOVÝCH
POLOTOVARŮ**



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Porovnání laserového a plasmového dělení plechových polotovarů“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lukáše Pelikána, s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v části seznamu použité literatury.

V Praze.....

Jiří Pudil:

**POROVNÁNÍ LASEROVÉHO A PLASMOVÉHO DĚLENÍ PLECHOVÝCH
POLOTOVARŮ**



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu této práce, panu Ing. Lukáši Pelikánovi za podněty a cenné rady, které vedly k vytvoření této bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval firmě KLIMA s. r. o., bez které ochotně napomohla poskytnutím materiálu a strojů pro vytvoření vzorků, na které se ve své práci odkazuji.

**POROVNÁNÍ LASEROVÉHO A PLASMOVÉHO DĚLENÍ PLECHOVÝCH
POLOTOVARŮ**



Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na porovnání laserového a plasmatického dělení plechových materiálů. Podává přehled o metodách dělení materiálu laserem, plasmatem a vodním paprskem. V experimentální části se nachází porovnáním laserového a plasmatického dělení materiálů na vzorcích, které byly navrženy přímo pro tuto práci.

Klíčová slova

Laser, plasma, vodní paprsek, dělení materiálu

Abstract

This bachelor thesis is focused on comparison of laser and plasma cutting of sheet metal blanks. It gives an overview of methods of cutting materials by laser, plasma and water jet. In the experimental part there is a comparison of laser and plasma cutting of samples which were designed especially for this thesis.

Keywords

Laser, plasma, water jet, cutting material



Obsah

Obsah	5
1 Úvod	7
2 Laser.....	7
2.1 Fyzikální princip laseru	7
2.2 Historie laseru.....	10
2.2.1 Podle aktivního prostředí.....	11
2.2.2 Podle vlnové délky optického zařízení.....	12
2.2.3 Podle délky generovaného impulsu.....	12
2.3 Řezání laserem	12
2.4 Zhodnocení technologie dělení materiálu laserem.....	13
1 Plasma	14
1.1 Fyzikální popis plasmatu	14
1.2 Historie plasmatu.....	17
1.3 Řezání plasmatem	18
1.4 Zhodnocení technologie dělení materiálu plasmatem.....	19
2 Vodní paprsek.....	20
2.1 Historie vodního paprsku	20
2.2 Řezání vodním paprskem	20
2.2.1 Vodní paprsek bez abraziva	21
2.2.2 Vodní paprsek s abrazivem	21
2.3 Zhodnocení technologie dělení materiálu vodním paprskem	21
3 Experiment	22
3.1 Popis experimentu.....	22

**POROVNÁNÍ LASEROVÉHO A PLASMOVÉHO DĚLENÍ PLECHOVÝCH
POLOTOVARŮ**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

3.2	Návrh 2D kontury	22
3.3	Použitý materiál	24
3.4	Použité stroje a technologie	24
3.4.1	Řezání laserem	24
3.4.2	Řezání plasmatem	25
3.5	Vyhodnocení vypálených vzorků	26
3.5.1	Tabulky naměřených hodnot.....	26
3.5.2	Plech o tloušťce 1 mm.....	26
3.5.3	Plech o tloušťce 2 mm.....	28
3.5.4	Plech o tloušťce 5 mm.....	31
3.5.5	Plech o tloušťce 10 mm.....	33
3.5.6	Plech o tloušťce 20 mm.....	35
3.5.7	Vizuální vyhodnocení „vlny“	38
3.6	Vyhodnocení experimentu	40
4	Závěr	41
5	Seznam použité literatury	43



1 Úvod

Jak je již patrné z názvu, tato bakalářská práce se zabývá dělením plechových polotovarů, a to využitím laseru a plasmu. Práce je rozdělena na dvě části, tedy na teoretickou část a praktickou část. V teoretické části se nachází stručné shrnutí některých metod dělení plechového materiálu. Jako zástupce metod dělení plechového materiálu jsem vybral laser, plasmu a vodní paprsek. V praktické části se nachází důkladný popis provedeného experimentu ve firmě Klima a. s. v Prachaticích, jehož náplní bylo srovnání laserového a plasmového pálení plechových materiálů o různých tloušťkách, vyhodnocení provedeného experimentu a závěr, ve kterém jsou shrnuty získané výsledky.

Dělením materiálu výše zmíněnými postupy se dostáváme do oblasti strojírenství zvané „nekonvenční metody obrábění“. V současnosti jsou však tyto nekonvenční nebo by se dalo říci progresivní metody dělení materiálu velmi rozšířeny a danou technologií dělení materiálu disponuje velké procento strojních výrobních podniků.

2 Laser

Slovo LASER pochází z angličtiny a je akronymem pro „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v přeneseném významu v českém jazyce znamená „zesílení světla pomocí stimulované emise záření“. Z názvu je tedy zřejmé, že laser je přístroj, jehož produktem je světlo získané přechodem částice z vyšší energetické hladiny do nižší. Svým významem laser patří k nejvýznamnějším technickým objevům druhé poloviny dvacátého století. Nalézá mnoho oblastí využití. [1] [3] [32]

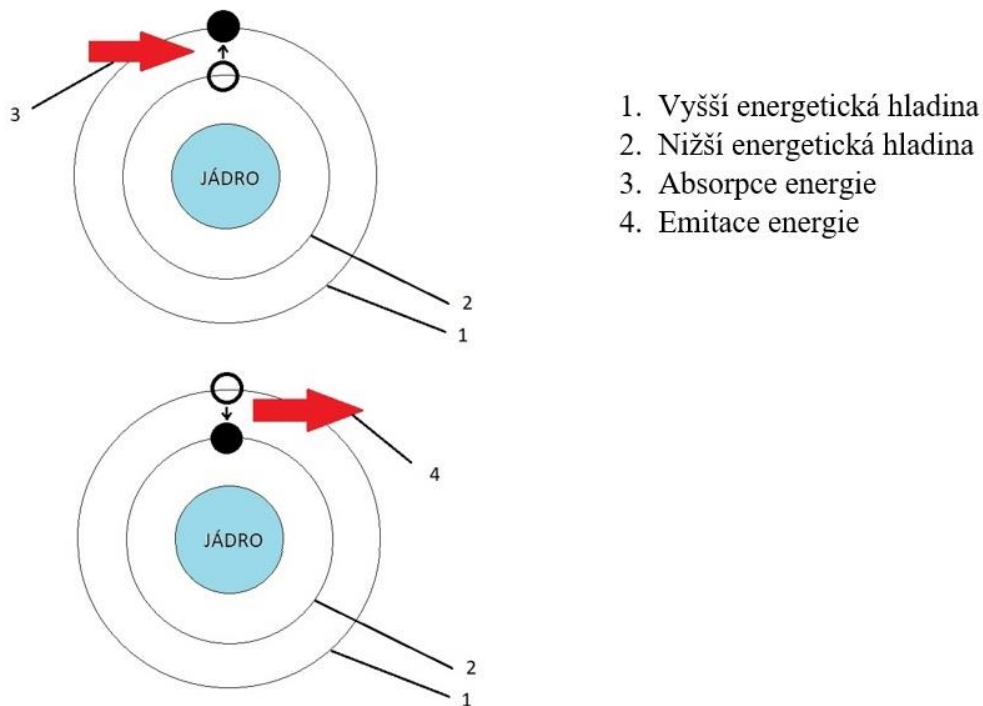
2.1 Fyzikální princip laseru

Jak nám již překlad slova laser napověděl, laserové světlo vzniká stimulovanou emisí. Emise je v tomto případě opakem děje, který se nazývá absorpce. Představme si zjednodušený planetární model atomu. Kolem kladně nabitého jádra krouží po uzavřených drahách elektrony. Na tyto elektrony působí přitažlivá síla. Každá dráha



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

představuje energetickou hladinu tak, že elektrony na nejbližší dráze k jádru mají nejméně energie, jelikož k překonání přitažlivých sil jádra a posunutí se do vzdálenější dráhy je třeba práce. Čím větší energii má elektron, tím vzdálenější je jádru a tím více práce k překonání přitažlivých sil vykonal. Elektrony atomu, které se nachází v základním stavu, se pohybují na energetické dráze s nejmenším poloměrem, tzv. „základní“. Aby byl uskutečněn přechod na vyšší energetickou hladinu, musí elektron absorbovat přesně určenou hodnotu energie – když přechází z vyšší na nižší hladinu, elektron emituje energii.

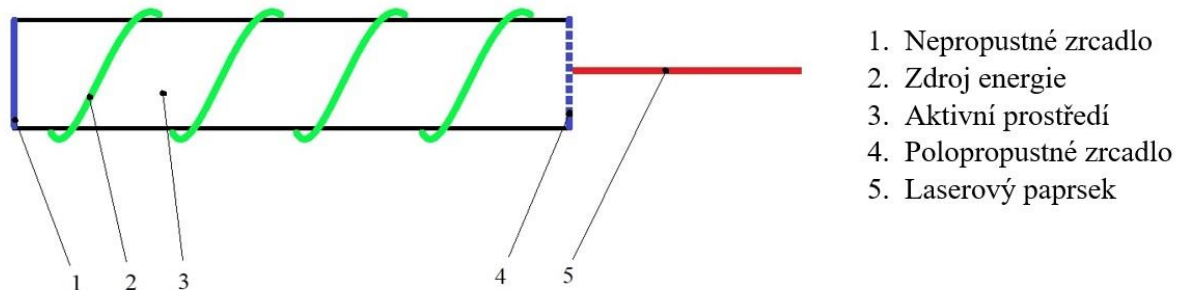


Obr. 1: Model atomu

Na Obr. 1 je znázorněn model atomu: nalevo ve stavu absorpce, napravo ve stavu emise.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

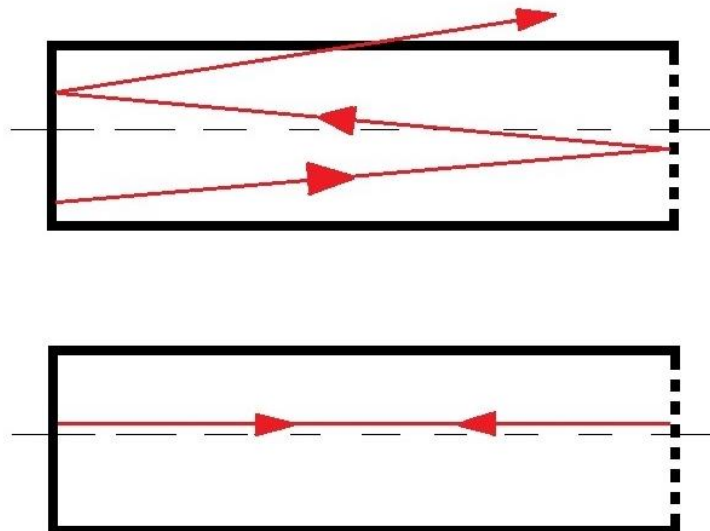


Obr. 2: Princip laseru; Zdroj: autor

Děje v laseru jsou o něco složitější. Pro získání laserového paprsku je postup následující:

Zdroj energie dodává do tzv. „aktivního prostředí“ energii. Často se můžeme setkat s použitím výbojky jako zdroje. Pumpovaná energie v aktivním prostředí způsobí excitaci u atomů, tedy nabudí elektrony z nižší elektrické hladiny do vyšší. Do tohoto stavu se nabudí většina elektronů, které se nacházejí v aktivním prostředí, a nastává „inverze populace“. Inverzí populace se nazývá stav, kdy je více elektronů na vyšší energetické hladině než na základní. Ve chvíli, kdy se elektrony vrací zpět na nižší energetickou hladinu, dochází ke zmíněné emisi, v tomto případě fotonů. Takto vyzářené fotony působí na další elektrony a způsobují stimulovanou emisi fotonů. Všechny fotony mají stejnou frekvenci. Tento děj probíhá u velkého množství atomů v aktivním prostředí a svým opakováním tak zesiluje světlo.

Fotony však létají do všech směrů, proto je potřeba, aby se v části zvané rezonátor vyskytovala soustava dvou zrcadel, která jsou umístěna rovnoběžně naproti sobě, z nichž jedno je polopropustné. Fotony se odrážejí od stěn zrcadel a způsobují další stimulované emise. Díky zrcadlům přibývá fotonů letících v ose laseru exponenciálně (znázorněno vpravo), fotony letící mimo osu unikají (znázorněno vlevo).



Obr. 3: Dráhy letu fotonů v aktivním prostředí; Zdroj: autor

Ve chvíli, kdy jeden z těchto fotonů dostatečně zesílí, pronikne polopropustným zrcadlem a začne tvořit produkt laseru, laserový paprsek. Vzniká tak koherentní světlo, má tedy totožnou vlnovou délku a totožný směr. [3] [5] [6]

2.2 Historie laseru

Ačkoli byl princip laseru, tedy stimulované emise, popsán Albertem Einsteinem již na počátku dvacátého století (konkrétně v roce 1917), od svého objevu po své zkonstruování čekal takřka půl století. Před příchodem laseru vzniklo několik pokusných zařízení, která se více či méně blížila té podobě laseru, kterou dnes známe a používáme.

Za významný milník po Einsteinově objevu lze považovat potvrzení této stimulované emise Rudolfem Ladenburgem a Hansem Kopfermannem, kteří se mezi lety 1928 a 1930 zabývali principem indukované emise. Přibližně kolem roku 1940 popsal sovětský vědec Valentin Alexandrovič Fabrikant využití principu zesílení světla pomocí plynného prostředí pro stimulovanou emisi.

Na cestě vývojem laseru stojí za zmínku také zařízení, které nese jméno podle zkratky „Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

v přeneseném významu v českém jazyce znamená „zesilovač mikrovln, využívající stimulovanou emisi záření“. První prototyp tzv. „maseru“, sestavil Charles Townesem se svým kolektivem. Tento stroj pracuje podobně jako laser na bázi stimulované emise. Maser však produkuje mikrovlnné záření.

První laser byl představen v roce 1960. O to se zasloužil americký inženýr a fyzik Theodore Harold Maiman. Maiman použil jako aktivní prostředí krystal rubínu.

Za další velký průlom ve zdokonalování této technologické novinky lze považovat vynález plynového CO₂ laseru, o který se postaral indický elektrotechnik a fyzik Čandra Kumar Naranbhai Patel při svém působení v Bellových laboratořích v Murray Hill, New Jersey. Plynový CO₂ laser se využívá dodnes v mnoha oblastech, zejména v průmyslu.

Přibližně ve stejné době probíhal výzkum i v konkurenčním tzv. Východním bloku. Nezávisle na americkém bádání prováděli sovětsí vědci Nikolaj Basov a Alexandr Prochorov výzkum, při kterém vyřešili problém nepřetržitého výstupu záření.

V roce 1964 byli společně oceněni Charles Townes, Nikolaj Basov a Alexandr Prochorov Nobelovou cenou za fyziku. [2] [3] [4]

Rozdělení laserů

Lasery lze dělit dle několika parametrů:

2.2.1 Podle aktivního prostředí

- **Plynové lasery**

Aktivní prostředí laserů tohoto typu je tvořené plynem. Tyto lasery pracují převážně v kontinuálním nastavení, jsou však schopny pracovat i v nastavení pulzním. Vybuzení je ve většině případů způsobeno elektrickým výbojem, lze je však budít i jinou metodou, například chemickou reakcí. Díky homogennímu prostředí mají plynové lasery dobré vlastnosti, jako stejnorodost paprsku a malá rozbíhavost svazku. Nevýhodou plynových laserů je jejich nízký výkon.

Příklady plynových laserů: Helium-Neonový laser, CO₂ laser. [16] [17] [18] [21]

- **Pevnolátkové lasery**

Pevnolátkové lasery využívají aktivního prostředí tvořeného pevnou látkou, která může mít krystalickou (pravidelnou), nebo amorfní (nepravidelnou) strukturu. Díky své



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

stabilitě mohou pevnolátkové lasery pracovat v různých nastaveních. Nejčastějším způsobem vybuzení je optická metoda.

Příklady pevnolátkových laserů: Rubínový laser, Nd: YAG (Yttrium Aluminium Granát) laser. [16] [18] [19] [21]

- **Kapalinové lasery**

Kapalinové, nebo také barvivové lasery používají pro své aktivní prostředí roztok organického barviva. K buzení se používá paprsek jiného laseru, nebo také světlo výbojky. Hlavní výhodou kapalinového laseru je možnost změny vlnové délky pomocí umístění a následného natočení difrakční mřížky. Nevýhodou těchto typů laseru je omezená životnost, kvůli chemickému rozkladu aktivního prostředí. [16] [20] [21]

- **Polovodičové lasery**

- **Plazmatické lasery**

2.2.2 Podle vlnové délky optického zařízení

Infračervené ($\lambda = 780 \text{ nm} - 1 \text{ mm}$)

Ultrafialové ($\lambda = 10 \text{ nm} - 360 \text{ nm}$)

Rentgenové ($\lambda = 10 \text{ nm} - 1 \text{ pm}$)

2.2.3 Podle délky generovaného impulsu

S velmi krátkými impulsy

S krátkými impulsy

S dlouhými impulsy [15] [16] [21]

2.3 Řezání laserem

Laser nachází své uplatnění v průmyslu hned v několika odvětvích. Odvětvím využívající laser je i dělení materiálu.

Samotné řezání laserem může probíhat třemi způsoby dle fyzikální definice vytváření řezu:

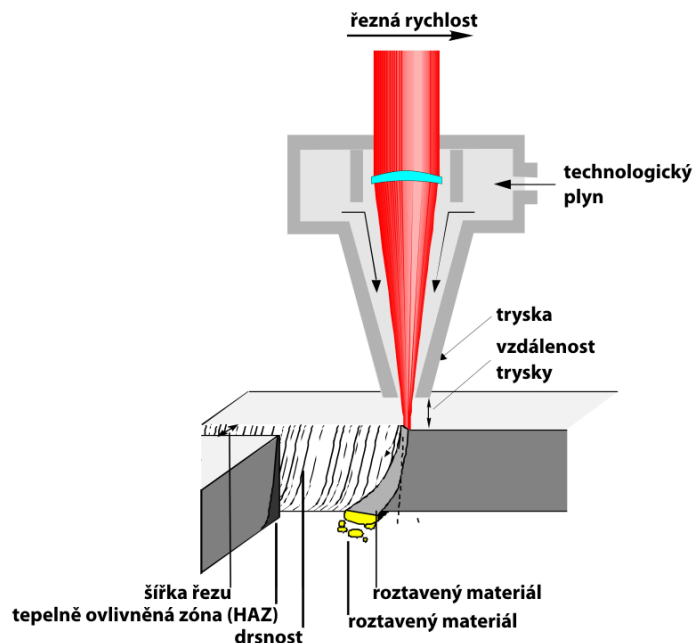
Sublimací – V důsledku velké intenzity laserového záření v oblasti řezu je materiál odstraněn především odpařováním.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Tavením – V oblasti řezu dochází k tavení řezaného materiálu, který je následně za pomoci inertního pomocného plynu odfouknut mimo tuto oblast.

Spalováním – Tato varianta spočívá v tom, že laserový paprsek ohřívá materiál v místě řezu až na jeho zápalnou teplotu, ten následně shoří během exotermické reakce s reaktivním plynem, který je přiveden do místa řezu. [22] [23]



Obr. 4: Princip laserového řezání [22]

2.4 Zhodnocení technologie dělení materiálu laserem

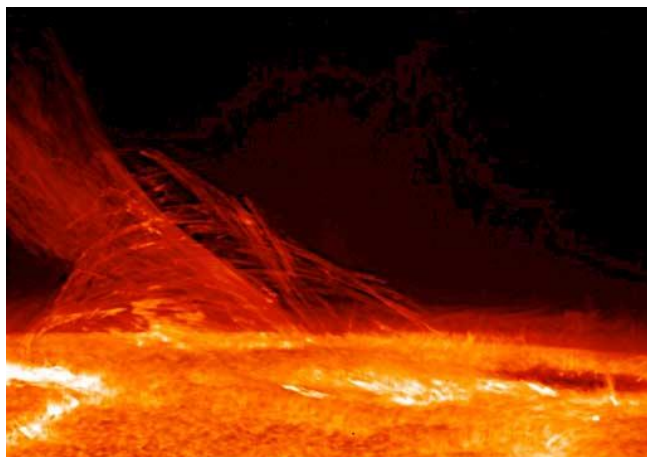
Hlavní výhodou technologie dělení materiálu laserem je přesnost řezu u tenčích materiálu. Laser je tak schopný řezat i malé otvory do materiálu o menší tloušťce. Ačkoli při laserovém pálení vzniká teplo, oproti jiným technologiím s obdobnou problematikou tepelného ovlivnění řezaného materiálu patří laser k těm, které přivádějí pouze malé množství tepla. Díky tomu nedochází k deformacím řezaného materiálu. Laserové řezání má také příznivou řeznou rychlost u tenkých materiálu. Mezi nevýhody této technologie patří omezení tloušťkou, laser není schopný dosáhnout stejné kvality u materiálu o rozdílné tloušťce. Další nevýhodou je zhoršení podmínek procesu řezu lesknoucích se materiálu. [29]



1 Plasma

Slovo plasma pochází z řeckého slova „πλάσμα“, což v překladu znamená modelovatelná hmota, nebo také želé. V dnešní době stále velké části populace slovo plasma nic neříká. Tento fakt se zdá být paradoxní, jelikož právě plasma tvoří až 99 % pozorovatelné hmoty vesmíru, a dokonce i na naší planetě je možné se s plasmatem setkat, jakožto produktem přírody.

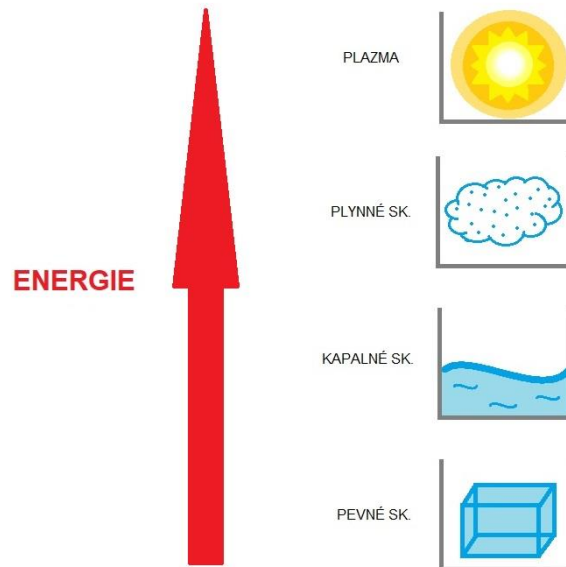
O plasmatu se mluví jako o čtvrtém skupenství hmoty a člověka provází už mnoho let ve formě ohně, blesku, polární záře či Slunce. [7] [8]



Obr. 5: Plasma na slunci [12]

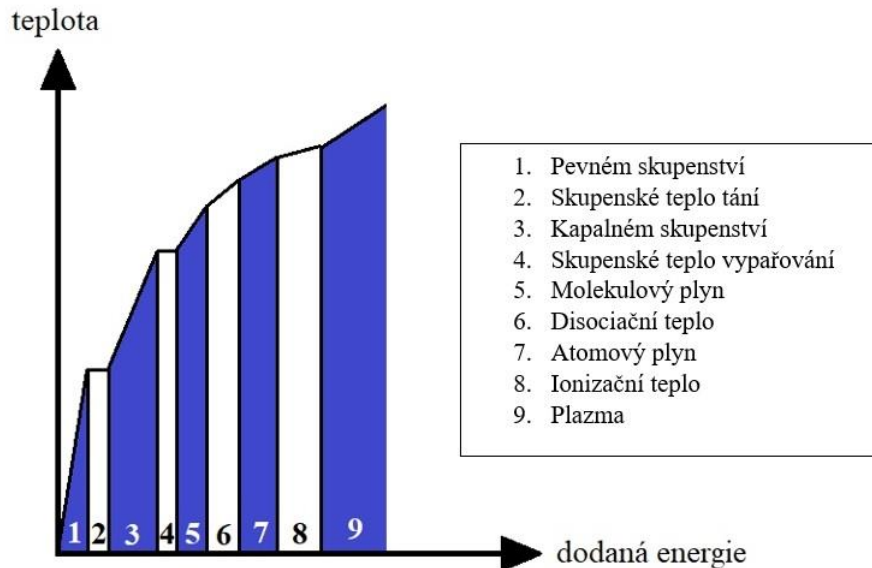
1.1 Fyzikální popis plasmatu

Nejprve je nutné si ujasnit, co je vůbec plasma. Plasma je, jak je již zmíněno výše, čtvrté skupenství hmoty známé jako ionizovaný plyn. Existují dva druhy získání plasmy, za pomoci vysoké teploty, nebo využitím elektrického výboje. Pro zjednodušení popisu plasmatu získaného vysokou teplotou si představme přeměny skupenství vody, tedy H_2O , které jsou právě na teplotě závislé.



Obr. 6: Skupenství hmoty; Zdroj: autor

Jestliže látce v pevném skupenství, tedy má podobu ledu, dodáme potřebné množství energie, která donutí atomy pohybem prolomit krystalickou mřížku, vznikne kapalina. Když je kapalina dostatečně ohřátá, aby se atomy vypařovaly rychleji, než se znovu zkondenzují, vznikne plyn, přesněji pára. Pokud pokračujeme s dodáváním energie a plyn stále ohříváme, nastává přechod mezi plynným skupenstvím a plasmatem. Dostaneme se tak přes proces, při kterém se molekuly dělí na samotné atomy až do stavu, kdy elektronům byla dodána taková energie, kdy se začnou z atomu oddělovat.



Obr. 7: Graf závislosti teploty na dodané energii; Zdroj: autor

Z grafu je patrné, že část přechodu z molekulového plynu přes atomový plyn až k plazmě má jiný charakter, než je tomu u přechodu z pevného skupenství na kapalné a z kapalného na plynné. Přechod z plynného skupenství do plasmatu je tedy povlovný. Tento jev je způsoben tím, že z molekulového plynu za procesu disociace vzniká teprve plyn atomový a až následně, při dodávání další energie, se atomy ionizují. Celkovým produktem je plazma.

Plazma lze dělit na dvě formy: slabě ionizované a silně ionizované na jedné straně, tzv. plně ionizované plazma na straně druhé. Hlavním rozdílem mezi slabě i. formou a silně i. formou plasmatu je poměr nabitých částic vůči neutrálním. Slabě ionizované plazma má poměr nabitých částic ku neutrálním velmi malý a jeho existence je možná i za pokojové teploty. Silně ionizované plazma má koncentraci nabitých částic oproti neutrálním a jeho existence je možná za vysokých teplot. Plně ionizované plazma obsahuje pouze ionty a elektrony.

Plazma je tzv. kvazineutrální soubor částic vykazující kolektivní chování, který obsahuje volné nosiče nábojů, což znamená, že prostorový náboj je zhruba roven nule. Plazma se od plynného skupenství liší hlavně působením sil na částice látky. V plynném skupenství se jedná především o vzájemném působení gravitačních sil. Oproti tomu u



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

plasmatu se nejedná jen o vzájemné působení gravitačních sil na jeho částice, ale také o působení elektromagnetických sil. To zapříčiňuje jak elektrickou vodivost, tak tepelnou vodivost plasmatu. [8] [9] [10] [11]

1.2 Historie plasmatu

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, slovo plasma pochází z řečtiny v období starověku. Dále se se slovem „plasma“ setkáváme v polovině 19. století, a to díky českému vědci v oblasti medicíny Janu Evangelistovi Purkynovi který použil označení slovem plazma čistou tekutinu, která vznikne po odebrání všech pevných částí z krve, a patří tak mezi zakladatele oboru cytologie.

V roce 1922 americký chemik Irving Langmuir užil slovo plasma k popisu ionizovaného plynu a byl za to v roce 1932 odměněn Nobelovou cenou. Langmuir se nechal inspirovat právě krevní plazmou, která nese červené a bílé krvinky, obdobně jako v jakémsi kapalném médiu, jehož součástí je ionizovaný plyn a v něm elektrony, ionty a neutrály.



Obr. 8: Irving Langmuir [14]

Langmuir se společně se svým kolegou Lewim Tonksem zabýval fyzikou a chemií žárovek s wolframovými vlákny s cílem vynalézt způsob, jak výrazně prodloužit životnost vlákna. Při snaze dosáhnout tohoto cíle, která nebyla marná, mimo jiné zjistil, že určité oblasti výbojky vykazují periodické změny elektronové hustoty, které dodnes



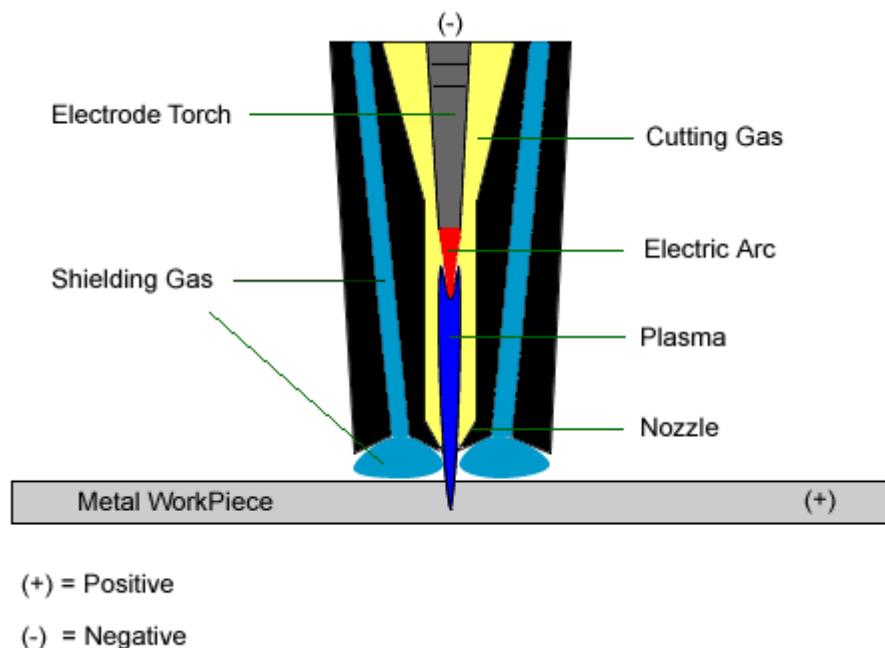
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

nazýváme Langmuirovi vlny. Langmuirův výzkum dodnes tvoří teoretický základ pro většinu technik zpracování plasmatu.

Výzkum plasmatu pokračoval a dnes se můžeme setkat s jeho využitím v mnohých odvětvích, a to nejen ve vědě, ale také ve strojírenství například při pálení plechů. Do budoucna se přemýšlí o využití plasmatu v energetice, či při konstrukcích raketových motorů. [9] [13] [14]

1.3 Řezání plasmatem

Dělení materiálu plasmatem spočívá ve využití vysoké teploty tavící řezaný materiál, kterou získáme pomocí tvořícího se plasmatu.



Obr. 9: Schéma vzniku plasmatu pro řezání [24]

Na obrázku 9 je znázorněné schéma vzniku plasmatu pro řezání kovového materiálu. Plasma vzniká zapálením elektricky vodivého řezného/plasmového plynu (na obr. 9 Cutting Gas) pomocí vzniklého elektrického oblouku. Samotný elektrický oblouk vzniká mezi katodou, tedy záporně nabitou wolframovou elektrodou (na obr. 9 Electrode Torch), a anodou, tedy kladně nabitou částí. Anoda může mít hned několik podob, může jí být kladně nabitý řezaný materiál, nebo samotná hlava



řezného hořáku. Tryska na hořáku má funkci zúžení plasmového oblouku, aby docházelo k co nejmenšímu prořezu materiálu, který by měl za důsledek jeho ztrátu. Ochranný plyn má hned několik funkcí, tou nejzásadnější však je ochrana oblasti řezání před účinky vnější atmosféry. [24] [25]

1.4 Zhodnocení technologie dělení materiálu plasmatem

Mezi hlavní přednosti dělení materiálu plasmatem patří možnosti řezu všech materiálů, které mají schopnost vést elektrický proud. Jako další významná plus této technologie je třeba zmínit řeznou rychlost a vynikající vlastnosti při řezání materiálů středních a větších tlouštěk. Významný nedostatek má tato technologie v šířce prořezu, která bývá větší, než je tomu u laseru a vodního paprsku. Potřeba zápalu pak znemožňuje vyřezání malých otvorů. [29]



2 Vodní paprsek

Řezání vodním paprskem je nekonvenční metoda dělení materiálu, využívající proud vody, který je vystřikován pod velkým tlakem směrem k řezné oblasti. V dnešní době patří metoda řezání vodním paprskem k nejrychleji se rozvíjejícím metodám nekonvenčního obrábění. [26] [27]

2.1 Historie vodního paprsku

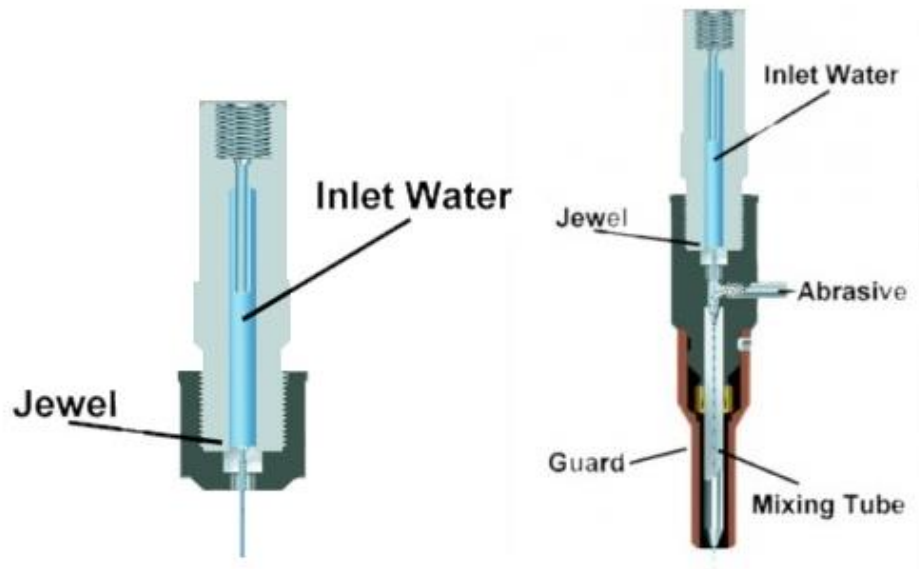
První průmyslové využití vodního paprsku lze datovat do doby více než před sto lety. V té době byl vodní paprsek používán hlavně při těžbě šterku a při čištění techniky, především těžební. Vývoj využití vodního paprsku tak, jak jej známe dnes, nastalo na počátku šedesátých let a až v sedmdesátých letech se začaly objevovat první použitelné systémy pro průmyslové využití.

V roce 1971 byl vyroben pro společnost Alton Box Board, která se zabývala výrobou lepenkových krabic, první použitelný systém řezání vodním paprskem. Nejen v této, ale i v dalších výrobních začal systém řezání kapalinovými paprsky vytlačovat v té době konvenční pily. [26]

2.2 Řezání vodním paprskem

Vodní paprsek patří mezi nejvšestrannější procesy řezání, protože dokáže řezat téměř jakýkoli typ materiálu. Jeho omezení zahrnují velmi křehké materiály, jako je například tvrzené sklo a některé druhy keramiky.

Dle řezaného materiálu se také odlišují metody použití. Technologie dělení materiálu můžeme rozdělit do dvou skupin dle složení řezné tekutiny:



Obr. 10: Schéma řezné hlavy vodního paprsku bez využití abraziva (vlevo) a s využitím abraziva (vpravo) [27]

2.2.1 Vodní paprsek bez abraziva

Jedná se o použití čistého vodního paprsku bez abrazivní příměsi. Využívá se při dělení měkkých materiálů.

2.2.2 Vodní paprsek s abrazivem

Tato metoda využívá abrazivní složky přimíchané do vodního paprsku, kde je vodní paprsek využit spíše jako pomocný faktor dodávající abrazivu rychlost. Tato technologie se využívá při dělení tvrdších materiálů, jako je například ocel. [27] [28]

2.3 Zhodnocení technologie dělení materiálu vodním paprskem

Díky technologii řezu vodním paprskem, kdy nedochází k tepelnému ovlivnění řezaného materiálu, nedochází v polotovarech k vnitřnímu pnutí. Další výhodou je také ekologičnost, při samotném řezu nevznikají žádné zplodiny. Mezi nevýhody však patří nevyhnutelný kontakt s vodou. Je proto nutné kovové materiály ošetřit a nasákavé materiály déle vysoušet. [28]



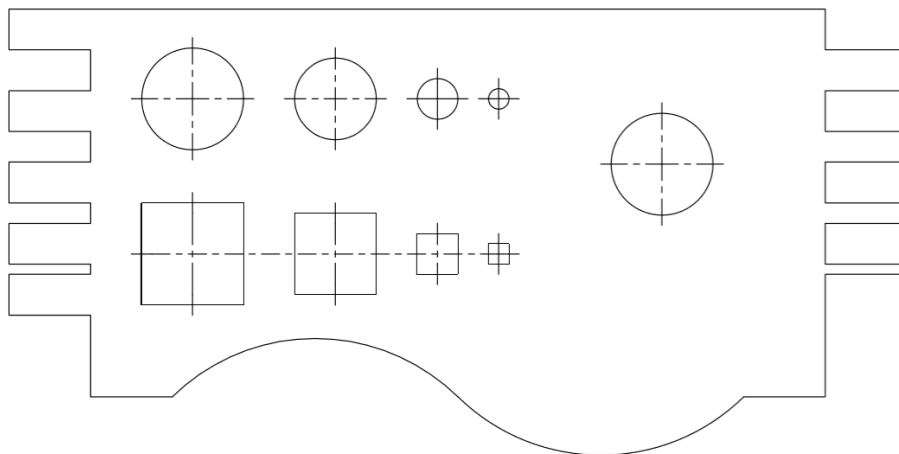
3 Experiment

3.1 Popis experimentu

Za účelem popsání technologických možností a kvalitativních parametrů při řezu laserem a plasmatem byl ve spolupráci s firmou KLIMA s. r. o., která se nachází v Prachaticích v Jihočeském kraji, proveden experiment v podobě vyřezání několika vzorků pomocí těchto technologií, a to tak, aby bylo možné vzorky porovnat a charakterizovat odlišnosti těchto dvou použitých technologií.

3.2 Návrh 2D kontury

Vypalovaná 2D kontura byla navržena za účelem porovnání schopnosti vyřezání několika odlišných technologicko-geometrických prvků laserem a plasmatem. Předpokládalo se vypálení do plechových materiálů o různých tloušťkách. Tloušťky materiálu byli zvoleny 1 mm, 2 mm, 5 mm, 10 mm a 20 mm. Tvar kontury byl stejný pro skupinu materiálů o tloušťce 1 mm a 2 mm, a stejný pro 5 mm, 10 mm a 20 mm.



Obr. 11: Tvar vypalované 2D kontury odpovídající tloušťce plechového materiálu 5 mm, 10 mm a 20 mm; Zdroj: autor

V pravé části kontury lze vidět výčnělky, jejichž délka je 20 mm, u materiálu tloušťky 20 mm je délka těchto výstupků 40 mm. Mezi každým výčnělkem je stejně velká dostatečná mezera z důvodu omezení tepelnému ovlivnění. Rozměr této mezery je 10



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

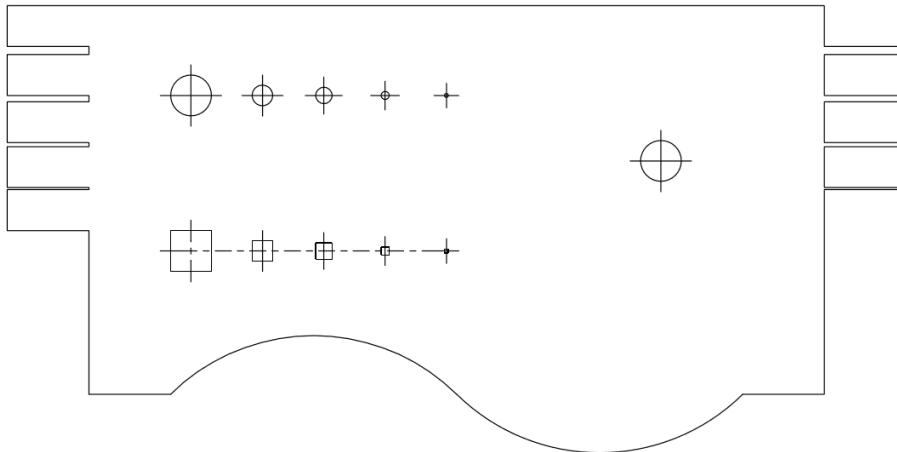
mm a je stejný pro kontury o tloušťce materiálu 1 mm, 2 mm, 5 mm, 10 mm a 20 mm. Šíře výčnělků jsou různé, jedná se o násobky tloušťky materiálu: 0,25x; 0,5x; 0,75x; 1x.

Na protější straně, tedy na levé, jsou patrné další prvky, tentokrát drážky, nebo také zářezy, jejichž hloubka je 20 mm, u materiálu tloušťky 20 mm je hloubka těchto zářezů 40 mm. Mezery mezi zářezy jsou opět stejné pro tloušťky materiálu 1 mm, 2 mm, 5 mm a 10 mm, tedy o šířce mezery 10 mm, která má stejný úděl – omezení tepelného ovlivnění mezi technologicko-geometrickými prvky. Šíře zářezu jsou opět násobky tloušťky materiálu a to: 0,25x; 0,5x; 0,75x; 1x.

V horní části kontury se nachází skupina čtyř kruhů. U materiálů tloušťky 5 mm a 10 mm jsou vzdálenosti mezi středy kruhů totožné, od menšího kruhu po největší kruh jsou to mezery o rozměrech: 15 mm, 25 mm a 35 mm. Vzdálenost mezi středem největšího kruhu a hranou kontury je 45 mm, střed tohoto kruhu je tedy vzdálen ode dna zářezu 25 mm. Průměry kružnic jsou vázány na tloušťku plechového materiálu, opět se jedná o násobky tloušťky, tedy: 0,5x; 1x; 2x a 2,5x.

Pod těmito čtyřmi kruhy je patrná čtveřice čtverců. Jejich velikost, umístění a mezery mezi nimi jsou obdobné jako u kruhů. Vzdálenosti mezi středy čtverců jsou: 15 mm, 25 mm a 35 mm. Střed největšího čtverce je od hrany kontury vzdálen 45 mm, ode dna zářezu tedy 25 mm. Délky hrany čtverců jsou v závislosti na tloušťce materiálu jejími násobky: 0,5x; 1x; 2x a 2,5x.

Vpravo od řad kruhů a čtverců je umístěn samostatný kruh, který svým průměrem odpovídá dva a půl násobku tloušťky plechového materiálu. Tento prvek slouží k porovnání s největším kruhem z již zmíněné skupiny levé části. Důvodem případné odlišnosti může být tepelné ovlivnění materiálu, způsobené výpalem technologicky-geometrických prvků v těsné blízkosti.



Obr. 12: Tvar vypalované 2D kontury odpovídající tloušťce plechového materiálu 1mm a 2 mm;

Zdroj: autor

U materiálů o tloušťce 1 mm a 2 mm je o jeden kruh, o poloměru 10 mm, a jeden čtverec, o straně 10 mm, více. Samostatný kruh v pravé části má pak průměr, tedy 10 mm. Tato hodnota se u plechů tloušťky 1 mm a 2 mm neliší.

Jiné rozměry má navržená kontura pro výpalek materiálu o tloušťce 20 mm. Výčnělky, zářezy, kruhy i čtverce mají stejný poměr, jsou stejnými násobky tloušťky materiálu. Celý výpalek je však celkově 2x větší, než jak je tomu u výpalků z tenčích materiálů, tedy délky výstupků a hloubka zářezů jsou 40 mm.

3.3 Použitý materiál

Vzorky byly vypáleny do plechového materiálu, kterým byla ocel ozn. ČSN 11 375, EN 10027-1: S235JRG2, EN 10027-2: 1.0038. Jedná se o běžnou konstrukční ocel s tryskaným povrchem. [33]

3.4 Použité stroje a technologie

3.4.1 Řezání laserem

Řezání pomocí laseru proběhlo na stoju od značky TRUMPF TruLaser 3040, jehož maximální výkon je až 4 000 W. Rozměry stolu laseru jsou 4 000 x 2 000 mm. Tento stroj, který používá firma KLIMA a. s., je schopný řezat laserem konstrukční ocel až o



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

tloušťce 20 mm, korozivzdornou austenitickou oceli až o tloušťce 15 mm a slitiny hliníku až o tloušťce 10 mm. [30]



Obr. 13: TRUMPF TruLaser 3040 ve firmě KLIMA s. r. o.; Zdroj: autor

3.4.2 Řezání plasmatem

Řezání s využitím plasmatu bylo provedeno na stroji OMNICUT 3600 AKU od firmy MGM, spol. s. r. o. Rozměry stolu jsou 2 500 x 12 000 mm. Schopnost stroje řezat plechové materiály je závislá na materiálu plechu a jeho tloušťce. Platí pravidlo, že je schopný řezat plechy ocelové při tloušťce 5 – 30 mm, plechy z hliníku a jeho slitin o tloušťce 4 – 15 mm a plechy nerezové o tloušťce 4 – 15 mm.



Obr. 14: OMNICUT 3600 ve firmě KLIMA s. r. o.; Zdroj: autor



3.5 Vyhodnocení vypálených vzorků

3.5.1 Tabulky naměřených hodnot

Vzorky o tloušťce 1 mm, 2 mm, 5 mm a 10 mm byli naměřeny na mikroskopu, vzorky o tloušťce 20 mm byli změřeny pomocí posuvného měřítka.

Výstupky a zářezy byli měřeny na třech místech, dole – část nejbližší ke středu kontury, střed – uprostřed geometricko-technologického prvku, nahoře – nejvzdálenější část od středu kontury.

Rozměry hran čtverce jsou uvedeny jako vzdálenost mezi rovnoběžkami, které jsou tečnami protějších stran v nejbližším místě. Hrana 1 je pak vzdálenost mezi rovnoběžkami, které jsou zároveň rovnoběžné se smyslem výstupků, respektive zářezů. Hrana 2 je pak vzdálenost rovnoběžek, které jsou kolmé k tomuto smyslu.

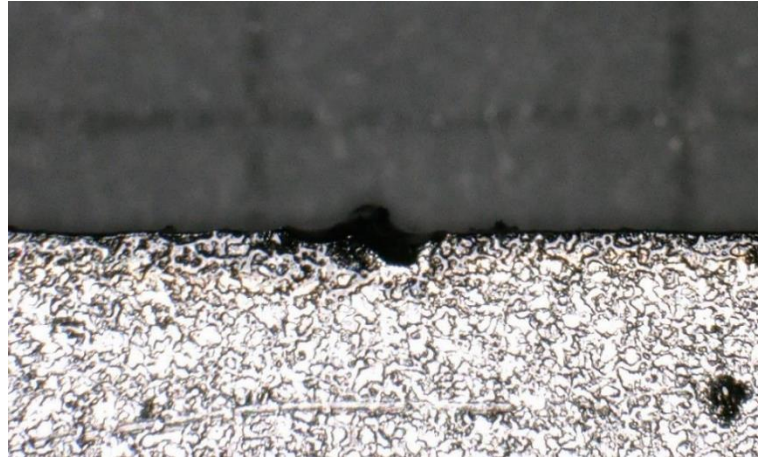
Jestliže je v tabulce u rozměru uvedena pomlčka (-), jedná se o geometricko-technologický prvek, který buď nebyl vypálen vůbec, nebo svou podobou po vypálení naprosto neodpovídá požadovanému tvaru.

3.5.2 Plech o tloušťce 1 mm

Plasmové pálení nebylo možné použít pro plech tak malé tloušťky. Pálení bylo možné provést pouze metodou využívající laser. Vzorek vypálený laserem však nese známky deformace, některé geometricko-technologické prvky nebylo možné vyřezat vůbec, nejmenší výstupek o šířce 0,25 mm a zářezy o šířce 0,25 mm a 0,5 mm.



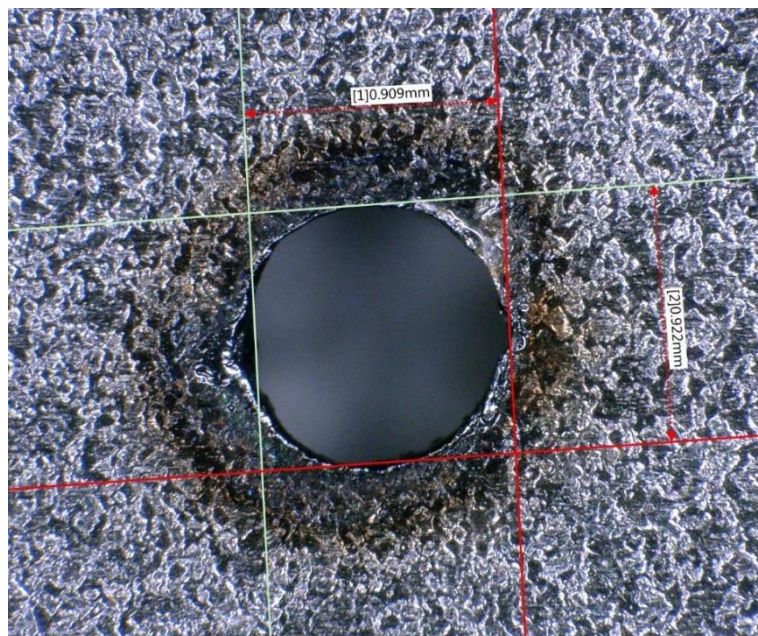
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



Obr. 15: Chybějící výstupek o šířce 0,25 mm na laserem vypáleném vzorku o tloušťce 1 mm;

Zdroj: autor

Laser dále nebyl schopný vypálit kroužky o průměru 0,5 mm a 1 mm a čtverec o hraně 0,5 mm. Ačkoli byl čtverec o hraně 1 mm vyřezán, laser nebyl schopný tak malý objekt pálit přesně.



Obr. 16: Vypálený čtverec o hraně 1 mm na vzorku o tloušťce 1 mm; Zdroj: autor

U vypálených výstupků se objevovala vada v podobě rozteklého materiálu (viz Obr. 18). Důvodem může být opětovné zahřátí ještě dostatečně nezchladlý materiál výpalku, který nezachová požadovaný tvar a „rozteče se“. Ve spodní části výstupků se



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

rovněž tvořili „krčky“, tedy zúžená místa v části, kde hraničí výstupek se zbytkem kontury.

Hrany čtverců jsou plny nerovností, stejně tomu tak je i u kruhů. Výjimku tvoří oba kruhy o průměru 10 mm, u kterých jsou hrany hladké.

Tab. 1: Naměřené hodnoty u vzorku o tloušťce 1 mm řezaného laserem

	Nominální hodnota [mm]	Dole [mm]	Střed [mm]	Nahoře [mm]
Výčnělek	0,25	-	-	-
Výčnělek	0,5	0,479	0,498	0,479
Výčnělek	0,75	0,744	0,725	0,744
Výčnělek	1	1	1,005	0,995
Zářez	0,25	-	-	-
Zářez	0,5	-	-	-
Zářez	0,75	0,77	0,773	0,759
Zářez	1	1,029	1,01	1,019
	Průměr nominální hodnota [mm]	Naměřená hodnota průměru [mm]		
Kruh	0,5	-		
Kruh	1	-		
Kruh	2	2,106		
Kruh	2,5	2,542		
Kruh	10	10,072		
Kruh	extra 10	10,064		
	Hrana nominální hodnota [mm]	Hrana 1 [mm]	Hrana 2 [mm]	
Čtverec	0,5	-	-	
Čtverec	1	-	-	
Čtverec	2	2,12	2,048	
Čtverec	2,5	2,601	2,573	
Čtverec	10	10,08	10,057	

Z naměřených hodnot vyplývá, že při tloušťce polotovaru 1 mm je při řezání laserem odchylka od nominálních hodnot pro malé otvory +0,05 až +0,12.

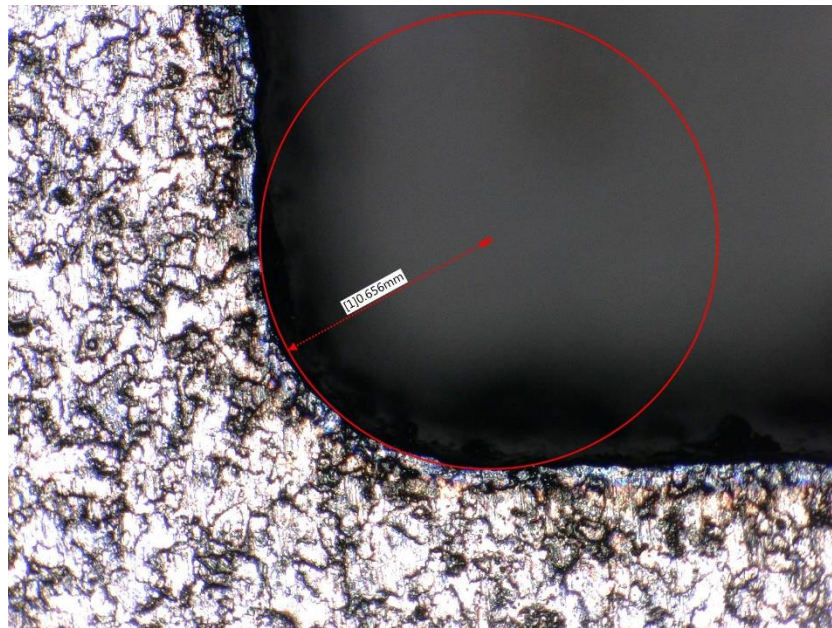
3.5.3 Plech o tloušťce 2 mm

Plech tloušťky 2 mm je stále příliš tenký pro pálení plasmou, byl tedy vyhotoven pouze vzorek řezaný laserem. Nejmenší z kruhových děr, které lze na materiálu této tloušťky vytvořit, je kruhová díra o průměru 2 mm. Čtvercová díra o rozměru hrany 1



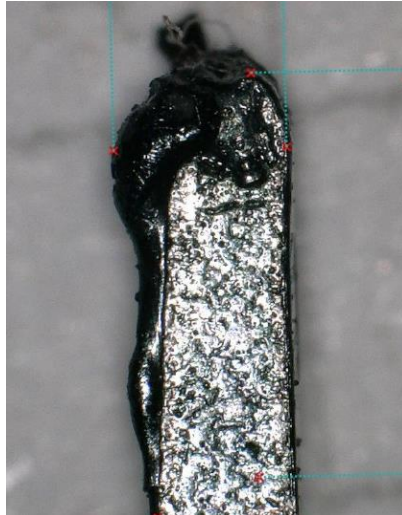
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

mm se vytvořila, ale tvar je velmi zdeformovaný, jedná se tedy spíše o kruh o minimální vepsané kružnici o průměru 0,9 mm. Na rozdíl od čtverců na vzorku o tloušťce 1 mm jsou hrany čtverců hladší. Rohy čtverců u vzorku o tloušťce 2 mm netvoří ostrý roh, je zaoblen. (R 0,66 mm).



Obr. 17: Zaoblený roh čtverce o délce strany na vzorku o tloušťce 2 mm; Zdroj: autor

Výstupky a zářezy se podařilo zhotovit již od nejmenšího nominálního rozměru. Tedy výstupek o šířce 0,5 mm, kde můžeme sledovat značné deformace způsobené vneseným teplem do příliš malé oblasti.



Obr. 18: Deformace způsobená rozteklým materiálem na části výstupku o šířce 1 mm na vzorku o tloušťce 2 mm; Zdroj: autor

Tab. 2: Naměřené hodnoty u vzorku o tloušťce 2 mm řezaného laserem

	Nominální hodnota [mm]	Dole [mm]	Střed [mm]	Nahoře [mm]
Výčnělek	0,5	0,455	0,683	0,399
Výčnělek	1	0,911	0,939	0,896
Výčnělek	1,5	1,424	1,432	1,398
Výčnělek	2	1,968	1,953	1,902
Zářez	0,5	0,716	0,744	0,736
Zářez	1	1,237	1,242	1,275
Zářez	1,5	1,745	1,787	1,741
Zářez	2	2,258	2,266	2,262
	Průměr nominální hodnota [mm]	Naměřená hodnota průměru [mm]		
Kruh	1	-		
Kruh	2	2,414		
Kruh	4	4,15		
Kruh	5	5,1		
Kruh	10	10,126		
Kruh	extra 10	10,156		
	Hrana nominální hodnota [mm]	Hrana 1 [mm]	Hrana 2 [mm]	
Čtverec	1	-	-	
Čtverec	2	2,346	2,342	
Čtverec	4	4,145	4,119	
Čtverec	5	5,178	5,162	
Čtverec	10	10,191	10,152	

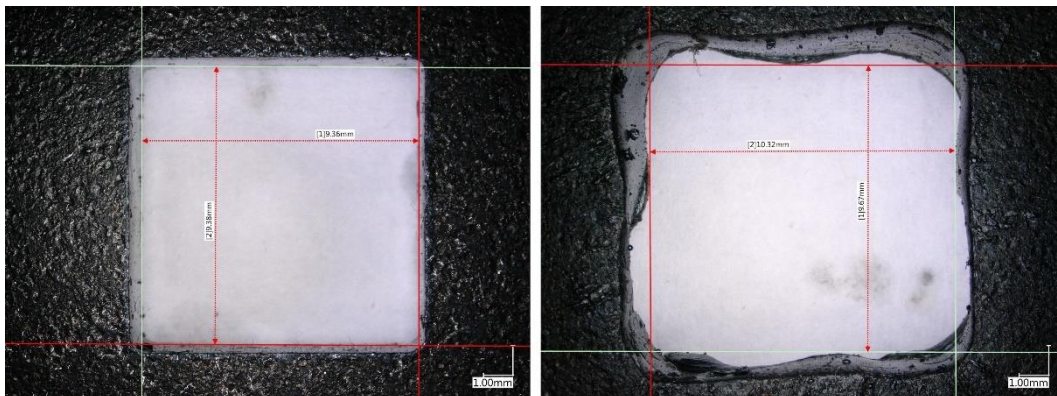


BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Z naměřených hodnot vyplývá, že při tloušťce polotovaru 2 mm je při řezání laserem odchylka od nominálních hodnot pro malé otvory +0,1 až +0,414. Naměřené hodnoty šířky výčnělků jsou spíše menší než nominální hodnota. Největší rozdíl je pak v části „nahoře“, kde se hodnoty lišily v průměru kolem 0,1 mm. Naměřené hodnoty šířky zářezů jsou větší než nominální hodnota. Největší rozdíl je pak v části „střed“, kde se hodnoty lišily v průměru kolem 0,26 mm.

3.5.4 Plech o tloušťce 5 mm

Vzorky o tloušťce 5 mm bylo již možné pálit i plasmatem. Na vzorcích je i vizuálně zřetelný rozdíl v kvalitě a přesnosti řezu mezi řezem laserem a řezem plasmatem.



Obr. 19: Vypálený čtverec o hraně 10 mm na vzorku o tloušťce 5 mm, vlevo: laser, vpravo: plasma; Zdroj: autor

Hrany řezu plasmatem jsou velmi deformované. Důvodem je stále malá tloušťka vzorku, přesněji málo materiálu pro rozvod tepla. Rovněž je u těchto vzorků znatelná tvorba krčků u výstupků, jak tomu je ve vzorku o tloušťce 1 mm vypáleného laserem.

Při měření vytvořených řezných hran je patrné, že obě technologie vytváří tak zvaný podkos. Boční stěna tedy není kolmá k rovině plechu. Vypálená mezera se ve směru dělicího paprsku zužuje a průřez mezery má tak charakteristický tvar písmena V. Podkos však nelze exaktně měřit, jelikož nerovnosti na ploše řezu jsou větší než samotná velikost podkosu.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Tab. 3: Naměřené hodnoty u vzorku o tloušťce 5 mm řezaného laserem

	Nominální hodnota [mm]	Dole [mm]	Střed [mm]	Nahoře [mm]
Výčnělek	1,25	1,07	1,04	1,1
Výčnělek	2,5	2,3	2,3	2,29
Výčnělek	3,75	3,52	3,54	3,55
Výčnělek	5	4,79	4,78	4,81
Zářez	1,25	1,46	1,45	1,45
Zářez	2,5	2,66	2,69	2,74
Zářez	3,75	3,97	3,97	3,98
Zářez	5	5,19	5,2	5,22
	Průměr nominální hodnota [mm]	Naměřená hodnota průměru [mm]		
Kruh	2,5	2,44		
Kruh	5	4,82		
Kruh	10	9,36		
Kruh	12,5	11,8		
Kruh	extra 12,5	11,88		
	Hrana nominální hodnota [mm]	Hrana 1 [mm]	Hrana 2 [mm]	
Čtverec	2,5	2,45	2,32	
Čtverec	5	4,79	4,85	
Čtverec	10	9,38	9,36	
Čtverec	12,5	11,78	11,73	

Z naměřených hodnot vyplývá, že při tloušťce polotovaru 5 mm je při řezání laserem odchylka od nominálních hodnot pro malé otvory $-0,77$ až $-0,05$. Naměřené hodnoty šířky výčnělků jsou spíše menší než nominální hodnota. Naměřené hodnoty šířky zářezů jsou větší než nominální hodnota. Největší rozdíl je pak v části „nahoře“, kde se hodnoty lišily v průměru kolem $0,23$ mm.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Tab. 4: Naměřené hodnoty u vzorku o tloušťce 5 mm řezaného plasmatem

	Nominální hodnota [mm]	Dole [mm]	Střed [mm]	Nahoře [mm]
Výčnělek	1,25	-	-	-
Výčnělek	2,5	1,22	1,33	1,42
Výčnělek	3,75	2,5	2,66	2,68
Výčnělek	5	3,71	3,75	3,8
Zářez	1,25	4,49	3,56	4,17
Zářez	2,5	4,4	3,59	4,29
Zářez	3,75	5,68	5,03	5,67
Zářez	5	6,76	6,18	6,9
	Průměr nominální hodnota [mm]	Naměřená hodnota průměru [mm]		
Kruh	2,5	4,26		
Kruh	5	5,68		
Kruh	10	9,42		
Kruh	12,5	12,18		
Kruh	extra 12,5	11,86		
	Hrana nominální hodnota [mm]	Hrana 1 [mm]	Hrana 2 [mm]	
Čtverec	2,5	-	-	
Čtverec	5	6,06	6,23	
Čtverec	10	9,67	10,32	
Čtverec	12,5	12,56	12,58	

Z naměřených hodnot vyplývá, že při tloušťce polotovaru 5 mm je při řezání plasmatem odchylka od nominálních hodnot pro malé otvory -0,58 až +1,76. Naměřené hodnoty šířky výčnělků jsou spíše menší než nominální hodnota. Naměřené hodnoty šířky zářezů jsou větší než nominální hodnota.

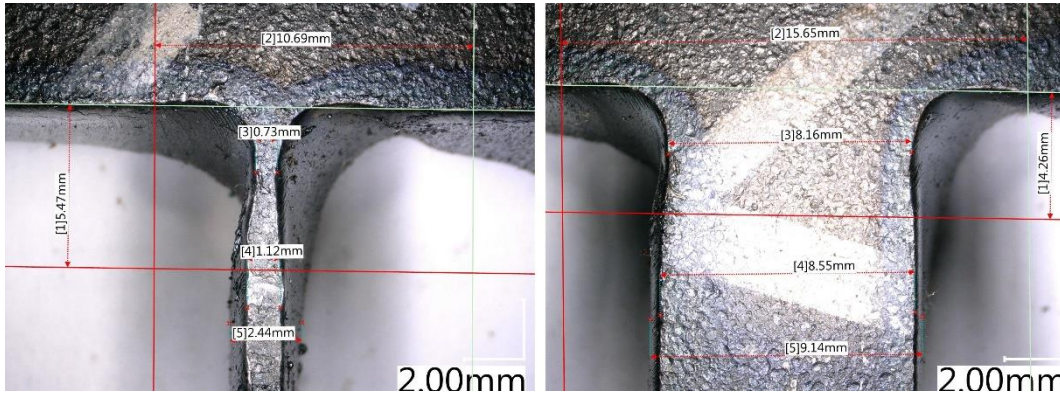
3.5.5 Plech o tloušťce 10 mm

Pro vzorky o tloušťce 10 mm pokračuje nastolený trend, přesnost a kvalita řezu je lepší u vzorků řezaných laserem. Nadále je možné pozorovat výše zmíněný podkos u hrany řezu, stále však těžko měřitelný.

U řezu plasmatem je znát zlepšení kvality řezu, naměřené hodnoty se stále liší od nominálních hodnot, mají však stabilnější charakter. U výstupků pak lze pozorovat redukcí výše zmíněných „krčků“ s přibývajícím šířkou výstupků samotných.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Obr. 20: Porovnání vzniklých „krčků“ u výstupku o předepsané šířce 2,5mm (vlevo) a u výstupku o předepsané šířce 10 mm (vpravo) na vzorku o tloušťce 10 mm; Zdroj: autor

Tab. 5: Naměřené hodnoty u vzorku o tloušťce 10 mm řezaného laserem

	Nominální hodnota [mm]	Dole [mm]	Střed [mm]	Nahoře [mm]
Výčnělek	2,5	2,19	2,2	2,22
Výčnělek	5	4,68	4,73	4,66
Výčnělek	7,5	7,14	7,16	7,16
Výčnělek	10	9,78	9,8	9,77
Zářez	2,5	2,76	2,85	2,87
Zářez	5	5,21	5,31	5,27
Zářez	7,5	7,79	7,77	7,85
Zářez	10	10,34	10,39	10,4
	Průměr nominální hodnota [mm]	Naměřená hodnota průměru [mm]		
Kruh	5	4,8		
Kruh	10	10,16		
Kruh	20	19,85		
Kruh	25	24,95		
Kruh	extra 25	24,97		
	Hrana nominální hodnota [mm]	Hrana 1 [mm]	Hrana 2 [mm]	
Čtverec	5	5,01	5,06	
Čtverec	10	10,13	10,13	
Čtverec	20	19,86	19,81	
Čtverec	25	24,81	24,71	

Z naměřených hodnot vyplývá, že při tloušťce polotovaru 10 mm je při řezání laserem odchylka od nominálních hodnot pro malé otvory -0,29 až +0,16. Naměřené



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

hodnoty šířky výčnělků jsou spíše menší než nominální hodnota. Naměřené hodnoty šířky zářezů jsou větší než nominální hodnota.

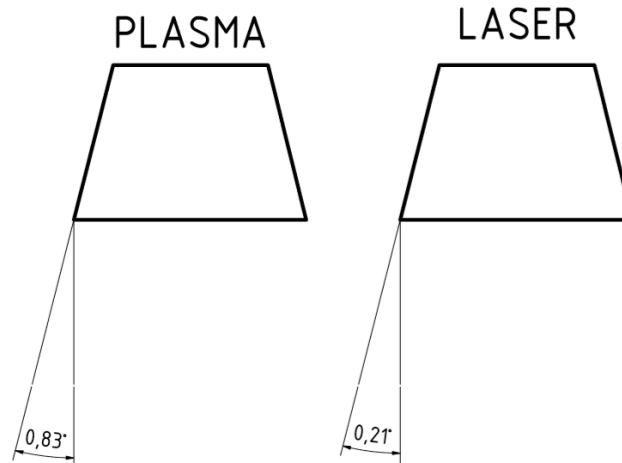
Tab. 6: Naměřené hodnoty u vzorku o tloušťce 10 mm řezaného plasmatem

	Nominální hodnota [mm]	Dole [mm]	Střed [mm]	Nahoře [mm]
Výčnělek	2,5	1,12	1,14	1,1
Výčnělek	5	3,6	3,6	3,58
Výčnělek	7,5	6,12	6,08	6,17
Výčnělek	10	8,55	8,5	8,5
Zářez	2,5	3,79	3,81	3,79
Zářez	5	6,38	6,36	6,47
Zářez	7,5	8,98	8,99	9,13
Zářez	10	11,54	11,46	11,54
	Průměr nominální hodnota [mm]	Naměřená hodnota průměru [mm]		
Kruh	5	6,36		
Kruh	10	10,48		
Kruh	20	19,88		
Kruh	25	24,9		
Kruh	extra 25	24,89		
	Hrana nominální hodnota [mm]	Hrana 1 [mm]	Hrana 2 [mm]	
Čtverec	5	7,44	6,7	
Čtverec	10	10,35	10,35	
Čtverec	20	19,96	20,08	
Čtverec	25	24,72	24,79	

Z naměřených hodnot vyplývá, že při tloušťce polotovaru 10 mm je při řezání plasmatem odchylka od nominálních hodnot pro malé otvory $-0,28$ až $+2,44$. Naměřené hodnoty šířky výčnělků jsou spíše menší než nominální hodnota. Naměřené hodnoty šířky zářezů jsou větší než nominální hodnota.

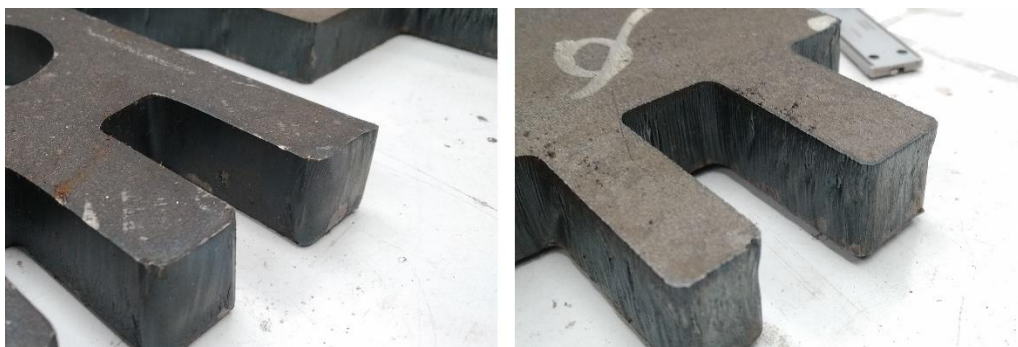
3.5.6 Plech o tloušťce 20 mm

Vyřezané vzorky do materiálu o tloušťce 20 mm jsou do jisté míry srovnatelné. Metoda využívající plasmata stále zaostává v přesnosti řezu. U širších výstupků takřka vymizel „krček“. Podkos u hrany řezu je stále znatelný a měřitelný.



Obr. 21: Znárodnění podkosu u vzorku o tloušťce 20 mm; Zdroj: autor

Na rozdíl od metody využívající laser, má vzorek vypálený pomocí plasmatu zdá se lepší kvalitu plochy řezu z pohledu vlnitosti povrchu. Vyhodnocení samotné drsnosti vzhledem k velké vlnitosti povrchu nebylo provedeno, jedná se pouze o subjektivní vizuální zhodnocení, které poskytuje prostor pro další bádání a porovnání kvality řezu obou technologií z jiného úhlu pohledu. U vzorku vypáleného laserem je znatelná deformace této plochy v podobě vrásčité struktury, která je způsobená klesající energií laserového paprsku propalujícího větší tloušťku materiálu.



Obr. 22: Vrásčítá struktura na ploše řezu u laserem řezaného vzorku (vpravo) a pro porovnání plasmatem řezaného (vlevo) vzorku tloušťky 20 mm; Zdroj: autor



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Tab. 7: Naměřené hodnoty u vzorku o tloušťce 20 mm řezaného laserem

	Nominální hodnota [mm]	Dole [mm]	Střed [mm]	Nahoře [mm]
Výčnělek	5	4,68	4,78	4,63
Výčnělek	10	9,57	9,55	9,6
Výčnělek	15	14,7	14,63	14,56
Výčnělek	20	19,6	19,56	19,55
Zářez	5	5,39	5,22	5,25
Zářez	10	10,24	10,34	10,25
Zářez	15	15,26	15,41	16,32
Zářez	20	20,33	20,27	20,1
	Průměr nominální hodnota [mm]	Naměřená hodnota průměru [mm]		
Kruh	10	10,03		
Kruh	20	20,04		
Kruh	40	40,03		
Kruh	50	50,13		
Kruh	extra 50	50,11		
	Hrana nominální hodnota [mm]	Hrana 1 [mm]	Hrana 2 [mm]	
Čtverec	10	10,06	10,07	
Čtverec	20	20,1	20,07	
Čtverec	40	40,17	40,04	
Čtverec	50	50,17	50,09	

Z naměřených hodnot vyplývá, že při tloušťce polotovaru 20 mm je při řezání laserem odchylka od nominálních hodnot pro malé otvory +0,03 až +0,17. Naměřené hodnoty šířky výčnělků jsou spíše menší než nominální hodnota. Naměřené hodnoty šířky zářezů jsou větší než nominální hodnota.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Tab. 8: Naměřené hodnoty u vzorku o tloušťce 20 mm řezaného plasmatem

	Nominální hodnota [mm]	Dole [mm]	Střed [mm]	Nahoře [mm]
Výčnělek	5	5,76	5,2	4,85
Výčnělek	10	10,54	10,33	10,29
Výčnělek	15	15,36	15,3	15,28
Výčnělek	20	20,42	20,27	20,13
Zářez	5	4,2	4,28	4,34
Zářez	10	9,6	9,8	9,77
Zářez	15	14,51	14,57	14,55
Zářez	20	19,52	19,65	19,51
	Průměr nominální hodnota [mm]	Naměřená hodnota průměru [mm]		
Kruh	10	10,78		
Kruh	20	19,24		
Kruh	40	39,69		
Kruh	50	49,48		
Kruh	extra 50	49,3		
	Hrana nominální hodnota [mm]	Hrana 1 [mm]	Hrana 2 [mm]	
Čtverec	10	10,18	10,57	
Čtverec	20	19,33	19,27	
Čtverec	40	39,28	39,53	
Čtverec	50	49,67	49,46	

Z naměřených hodnot vyplývá, že při tloušťce polotovaru 20 mm je při řezání plasmatem odchylka od nominálních hodnot pro malé otvory $-0,76$ až $+0,78$. Naměřené hodnoty šířky výčnělků jsou spíše menší než nominální hodnota. Naměřené hodnoty šířky zářezů jsou větší než nominální hodnota.

3.5.7 Vizuální vyhodnocení „vlny“

Při vizuální kontrole bylo zjištěna deformace na vzorku vyřezaném plasmatem v podobě vlnitosti povrchu plochy řezu. Tato vlnitost se zdá být závislá na změně vektoru pohybu hořáku.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Obr. 23: Porovnání plochy řezu vlny vyřezané plasmatem (vlevo) a laserem (vpravo), ;Zdroj: autor

Předpokládaná vada v místě přechodu z konvexní křivky do konkávní se neobjevila, je tedy neprokazatelná. U vzorků vyřezaných plasmatem se však objevila deformace v místech jiných přechodů, konkrétně v místech, kde by měl být ostrý roh, došlo k výraznému závleku plamene, který při prudké změně směru udělal výrazný oblouk na ploše řezu. Rovněž z pohledu kolmo na rovinu plechu je na rovných úsecích, které navazují na prudké změny směru vidět výrazná změna geometrie reálné geometrie kontury. Tato změna je dána právě závlekem plamene.



Obr. 24: Znázornění přechodů u úseků, které následují prudkým změnám směru řezu, u vzorků vyřezaných laserem (nahore) a plasmatem (dole); Zdroj: autor



3.6 Vyhodnocení experimentu

U vzorků o nejmenších tloušťkách je metoda řezání laserem vhodnější z důvodu neschopnosti plasmatu řezat tenké kovové materiály. Vzorek o tloušťce 1 mm řezaný laserem je deformovaný. Jak je již výše uvedeno, výčnělek o šířce 0,25 mm a zářezy o šířce 0,25 mm a 0,5 mm nebyl laser schopný vyrobit. Výčnělky navíc nesou známky deformace „roztečením“ v části nejvzdálenější středu kontury. Dále nebyl schopný vyřezat kroužky o průměru 0,5 mm a 1 mm a čtverec o hraně 0,5 mm. Čtverec o hraně 1 mm vyřezán byl, tvarově však připomíná kruh.

Vzorek o tloušťce 2 mm bylo možné opět vyřezat pouze laserem. Vzorek byl vyřezán se všemi výčnělky i zářezy. Stále však použitá technologie není schopná zhotovit kruh o průměru 1 mm a čtverec s délkou hrany 1 mm. Výčnělky stále nesou známky deformace uvedené výše. Dále je znatelná deformace formou „krčků“ v místě předělu výstupku a hrany zbytku kontury.

Vzorky o tloušťce 5 mm bylo již možné vypálit oběma technologiemi. Vzorek vyřezaný laserem se zdá být lepší než vzorek vyřezaný plasmatem. Geometricko-technologické prvky na vzorku vyřezaného laserem mají znatelně vyšší rozměrovou přesnost. Hrany vzorku vyřezaného plasmatem jsou deformované. Plochy řezu se nejsou kolmé k rovině plechu, vzniká podkos.

Vzorky o tloušťce 10 mm se ztotožňují s nastoleným trendem, vzorek vyřezaný laserem je po rozměrové stránce přesnější. U obou vzorků lze dále sledovat zmíněný podkos u plochy řezu. U výstupků větších šířek lze pozorovat menší tendenci k tvorbě „krčků“.

Vzorky o tloušťce 20 mm byly vzorky o největších rozměrech a největší tloušťce. U obou vzorků lze stále pozorovat zmíněný podkos, který je větší u vzorku páleného plasmou a to konkrétně 0,83°. U vzorku páleného laserem jsem naměřil podkos 0,21°. Metoda řezání laserem vyprodukovala vzorek o stále ještě vyšší rozměrové přesnosti, na plochách řezu lze však pozorovat značný efekt úbytku energie laserového paprsku a tím způsobené vrásnění a vlnitost plochy řezu zejména ve spodní části. V této šířce



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

se již projevuje výhoda plasmu pro dělení větších tloušťek, kdy tento efekt úbytku energie plamene není tak citelný a plocha řezu je ve srovnání s laserem hladší.

4 Závěr

V teoretické části této bakalářské práce se nachází seznámení s vybranými nekonvenčními metodami dělení materiálu. Nalezneme zde kapitoly o dělení materiálu využitím laseru, plasmatu, či vodním paprskem. Vedle základního popisu jednotlivých metod, obsahuje každá kapitola stručnou historii metody, popis či případné rozdělení metody, u kapitol Laser a Plasma se nachází také vysvětlení fyzikálního principu. Závěrem každé ze zmíněných kapitol v teoretické části je zhodnocení jednotlivé metody.

V praktické části, které je pojmenována Experiment, se nachází vyhodnocení vzorků, získaných ve firmě KLIMA a. s. Tomu předchází stručný popis experimentu, výpis použitých strojů, materiálu a navržení 2D kontury. V této kapitole je možné se detailně seznámit s tvarem jednotlivých kontur, jejich geometricko-technologických prvků, a jejich rozměry, které se liší v závislosti na tloušťce materiálu.

Kontury byly navrženy pro tloušťky 1 mm, 2 mm, 5 mm, 10 mm a 20 mm. Plasma však není schopná řezat tento materiál o tloušťce 1 mm a 2 mm. Řez kontury těchto „malých“ tloušťek byl proveden pouze na laseru.

Vyhodnocení jednotlivých technologií bylo provedeno z pohledu závislosti kvality a rozměrové přesnosti řezu na tloušťce materiálu. Jednoznačně lze usoudit, že pro řez materiálů o malých tloušťkách je vhodnější laser, jelikož, jak je výše zmíněno, plasma není schopné tyto materiály řezat vůbec. Srovnání kvality řezu obou technologií lze pozorovat až u vzorků o tloušťce 5 mm. Metoda dělení materiálu využívající laser zde z pohledu rozměrové přesnosti a kvalitativních vlastností řezu předčila metodu využívající plasma. Tento trend se nezměnil ani u vzorků o tloušťce 10 mm. U vzorků materiálu o tloušťce 20 mm je stále rozměrová přesnost laseru lepší, po provedení vizuální kontroly plochy řezu se však ukazuje, že řez laserem vykazuje známky vlnitosti



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

povrchu. Přesné vyhodnocení a měření vzniklých vrubů, kráterů a celkové drsnosti plochy řezu může být námětem pro další měření.

Z provedeného experimentu lze usuzovat, že technologie řezu laserem byla po rozměrové stránce konkrétních navržených 2D kontur přesnější, než u řezu plasmatem. Byla prokázána schopnost řezání plechových materiálů o malých tloušťkách a zároveň schopnost přesného výřezu menších otvorů. Na druhé straně technologie řezání pomocí plasmatu při řezu plechových materiálů o větší tloušťce kvalitativně nezaostává. Samotný proces řezu je rychlejší a náklady na provoz jsou výrazně nižší.



5 Seznam použité literatury

- [1] Freitinger Skalická Zuzana, Mgr., Halaška Jiří, Ing., Ph.D, Havránková Renata, Mgr., Ph.D, Kubeš Jiří, MUDr., Ph.D, Navrátil Leoš, prof. MUDr., CSc., Navrátil Václav, Bc., Sabol Jozef, doc. Ing., DrSc., Sirový Ladislav, Bc. a Zölzer Friedo, doc. Dr., Ph.D. *Radiobiologie: 8.2.1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP LASERU* [online]. [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/8-kapitola/82/821.html>
- [2] Historie laserů. *LASCAM systems* [online]. Praha, 25.7.2015 [cit. 2018-11-16]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/historie/>
- [3] SADOWSKI, Andrzej a Rudolf KREHLIK. *Lasery v obrábění a metrologii*. Přeložil D. VAVROUCH. Praha: SNTL, 1977.
- [4] *Leonardo technology s.r.o.: Historie vývoje laseru* [online]. [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>
- [5] KACHTÍK, Lukáš. *Laser a vše o něm: Princip laseru* [online]. [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/princip.html>
- [6] JAROSLAV, Kusala. *Lasery kolem nás: Princip laseru* [online]. 2004 [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
- [7] Cleveland, Cutler J. Morris, Christopher. (2009). *Dictionary of Energy (Expanded Edition) - plasma*. (pp. 390). Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007SXXM2/dictionary-energy-expanded/plasma>
- [8] SCHMIEDT, Lukáš. *Plazma: Úvod do fyziky plazmatu* [online]. [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/>
- [9] KRÁLOVÁ, Magda. *Encyklopedie: Plazma* [online]. Plzeň [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/skupenstvi/plazma>



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

- [10] Astrofyzika: Plazmový vesmír | Co je to plazma?. *Aldebaran* [online]. Praha [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/plazma/basics.php>
- [11] RUTHERFORD, P. H a Robert J. *Introduction to plasma physics*. Philadelphia: Institute of Physics Pub., 1995. ISBN 07-503-0183-X.
- [12] Plasma of the Sun. In: *National Aeronautics and Space Administration: NASA Official: Brian Dunbar* [online]. 21.3.2007 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/hinode/solar_017.html
- [13] FITZPATRICK, Richard. [online]. 31. 3. 2011 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/Plasmahtml/node4.html>
- [14] MLA style: Irving Langmuir – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2018. Mon. 26 Nov 2018. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1932/langmuir/biographical/>
- [15] Rozdělení laserů. *LASCAM systems* [online]. Praha, 2.8.2015 [cit. 2018-11-27]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [16] KACHTÍK, Lukáš. *Laser a vše o něm: Typy laserů* [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/typy.html>
- [17] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Lasery plynové* [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/788-lasery-plynove>
- [18] Khare, R.P.. (2004). *Fiber Optics and Optoelectronics*. Oxford University Press. Retrieved from: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00TW39C7/fiber-optics-optoelectronics/laser-base-introduction>



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

- [19] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Lasery využívající pevné látky* [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/786-lasery-vyuzivajici-pevne-latky>
- [20] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Lasery kapalinové* [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/787-lasery-kapalinove>
- [21] Lasery e-learning: Možné dělení typů a druhů laserů. *Leonardo technology s.r.o.* [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [22] SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (LASER CUTTING). *LAO - průmyslové systémy, s.r.o.* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [23] GREPL, Martin, Marek PAGÁČ a Jana PETRŮ. Laser Cutting of Materials of Various Thicknesses. *Acta Polytechnica* [online]. Czech Technical University in Prague, 4/2012, 2002(52) [cit. 2019-04-18]. ISSN 1805-2363.
- [24] *Plasma Cutter: How It Works?* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.plasma-cutter.org/how-it-works/>
- [25] *Hypertherm, Inc: Types of plasma* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/en-US/learn/cutting-education/plasma-technology/types-of-plasma/?region=NART>
- [26] *One-Stop Sealing Ltd.: History of water jet cutting* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.onestopsealing.co.uk/water-jet-cutting/history-water-jet-cutting>
- [27] *Waterjets.org: How abrasive waterjets work* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://waterjets.org/how-abrasive-waterjets-work/>



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

- [28] *Řežeme vodou.cz: řezání vodou* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z:
<http://www.rezeme-vodou.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>
- [29] *PLAZMACZ: Plazma přednosti a nevýhody* [online]. [cit. 2019-04-20].
Dostupné z: <http://www.plazmacz.cz/plazma-prednosti-a-nevyhody/>
- [30] *ZPRACOVÁNÍ PLECHU: LASEROVÉ DĚLENÍ* [online]. [cit. 2019-06-27].
Dostupné z: <http://www.klimacz.cz/cs/zakazkova-vyroba-76645/zpracovani-plechu>
- [31] *ZPRACOVÁNÍ PLECHU: PLASMOVÉ DĚLENÍ* [online]. [cit. 2019-06-27].
Dostupné z: <http://www.klimacz.cz/cs/zakazkova-vyroba-76645/zpracovani-plechu>
- [32] *Progresivní metody v obrábění: studijní opora* [online]. OSTRAVA, 2011 [cit. 2018-10-10].
Dostupné z:
http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrabeni_FINAL.pdf
- [33] *Salzgitter Mannesmann Stahlhandel: ZNAČKA OCELÍ DIN - EN - ČSN* [online]. [cit. 2019-06-27]. Dostupné z:
<http://www.salzgitter.cz/index.php?page=33>