

**Přírodovědecká fakulta univerzity Palackého
v Olomouci**

Katedra optiky

**Optimalizace laserových parametrů a tvorba
databáze laserových parametrů**

Laser parameter optimization and creation of laser parameter database

Diplomová práce

Master's thesis



Vypracoval:

Author

Bc. Jan Šana

Vedoucí práce:

Supervisor

Ing. Miroslav Šárník

Studijní obor: Digitální a přístrojová optika

Studijní rok: 2014/2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího mé diplomové práce Ing. Miroslavem Šárníkem a za použití literatury a zdrojů uvedených v závěru práce.

V Olomouci dne 27. 4. 2015

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Miroslavu Šárníkovi za poskytnuté materiály a jeho odborné vedení při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. za možnost využití jejich podniku a za poskytnutí technologií potřebných ke zrealizování této práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá využitím laseru ve strojírenství, laserovým dělením materiálu a parametry ovlivňující kvalitu řezu. Dále je zde databáze laserových parametrů pro řezání a návrh jejich optimalizace pro zvýšení kvality řezu. V závěru práce je pak srovnání dosažených výsledků a vyhodnocení optimalizace laserového řezání.

Klíčová slova: laser, optimalizace, průmyslové využití laseru, laserové řezání, databáze parametrů

Abstract

The diploma thesis is dealing with the laser use in engineering, laser cutting of materials and parameters that have impact on the quality of the cut. Furthermore there is the database of cutting parameters and suggestion of the optimization for increasing quality of the cut . At the end of the thesis is the discussion of the results and the evaluation of the optimization of laser cutting.

Keywords: laser, optimization, industrial lasers, laser cutting, parameter database

OBSAH

1. Úvod.....	8
2. Laser.....	9
2.1. Historie laseru.....	9
2.2. Princip laseru.....	11
2.3. Konstrukce laseru.....	12
2.3.1. Aktivní prostředí.....	12
2.3.2. Optický rezonátor.....	13
2.3.3. Budící zařízení.....	13
2.3.4. Chladící zařízení.....	14
2.4. Vlastnosti laserového záření.....	14
2.4.1. Koherentnost, monochromaticnost, směrovost.....	14
2.4.2. Vlnová délka, mód paprsku.....	14
2.4.3. Polarizace, absorpce.....	15
2.5. Rozdělení laseru.....	16
2.5.1. Rozdělení podle aktivního prostředí.....	16
2.5.1.1. Pevnolátkové lasery.....	17
2.5.1.2. Kapalinové lasery.....	18
2.5.1.3. Plynové lasery.....	18
2.5.1.4. Polovodičové lasery.....	19
2.5.1.5. Vláknové lasery.....	20
2.5.2. Rozdělení podle vlnové délky.....	21
2.5.3. Rozdělení podle režimu práce.....	21
2.5.4. Rozdělení podle bezpečnosti třídy.....	21
3. Využití laseru ve strojírenství.....	22
3.1. Laserové gravírování.....	22
3.2. Laserové leštění a čištění.....	22
3.3. Laserové kalení.....	23
3.4. Laserové povlakování.....	23

3.5. Laserové navařování.....	23
3.6. Laserové svařování.....	24
3.7. Laserové vrtání.....	25
3.7.1. Vrtání jednotlivými impulzy.....	26
3.7.2. Nárazové vrtání.....	27
3.7.3. Trepanační vrtání.....	27
3.7.4. Spirálové vrtání.....	27
4. Laserové řezání.....	28
4.1. Metody laserového řezání.....	28
4.1.1. Laserové oxidační řezání.....	28
4.1.2. Laserové protavování.....	29
4.1.3. Laserové sublimační řezání.....	29
4.1.4. Laserové orýsování.....	29
4.2. Asistenční plyny pro laserové řezání.....	29
4.2.1. Argon.....	30
4.2.2. Dusík.....	30
4.2.3. Kyslík.....	30
4.2.4. Směsné plyny.....	30
4.3. Řezné parametry.....	31
4.4. Vyhodnocení laserového řezání	32
5. Praktická část.....	34
5.1. Specifikace laseru.....	34
5.2. Databáze laserových parametrů pro řezání materiálů.....	35
5.3. Rozsah laseru.....	40
5.4. Současná oblast řezání.....	40
5.5. Návrh vzorku.....	42
5.5.1. CRESS 347.....	42
5.6. Výroba a měření vzorků.....	43
5.7. Vyhodnocení vzorků.....	46

5.8. Zhodnocení výsledku experimentu.....	50
6. Závěr.....	51
Seznam použité literatury.....	53
Seznam použitých zkratek a symbolů.....	54
Seznam tabulek.....	54
Seznam obrázků.....	55
Seznam grafů.....	56
Příloha č. 1	57
Příloha č. 2	61

1. Úvod

Diplomová práce vznikla ve spolupráci s firmou Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. (dále jen „Honeywell“), která se zabývá vývojem a výrobou leteckých součástí. Cílem diplomové práce je vytvoření databáze laserových parametrů pro řezání kovů technologickým laserovým systémem, které firma Honeywell využívá a jejich následná optimalizace za docílením zvýšení kvality řezu, zefektivnění výroby a zlepšením výrobního procesu.

Diplomová práce je rozdělena do dvou částí. První, teoretická část je zaměřena na historii, princip a konstrukci laseru. Dále jsou popsány vlastnosti laserového záření a rozdělení laseru, ať už podle aktivního prostředí, vlnové délky, režimu práce nebo podle třídy bezpečnosti. Velký prostor je zde věnován využití laseru ve strojírenství a jeho technologickým aplikacím (od laserového gravírování a kalení až po laserové vrtání a svařování). Samostatnou kapitolu má pak laserové řezání, ve které jsou popsány metody laserového řezání, asistenční plyny určené pro laserové dělení materiálu, rezné parametry a vyhodnocování kvality laserového řezání.

V druhé, praktické části se ve spolupráci s firmou Honeywell zabývám seznámením a zmapováním maximálního rozsahu laseru, který firma využívá pro dělení materiálu, jeho vlastnostmi a využitím. Dále je pak zpracována databáze laserových parametrů pro řezání z dat poskytnutých firmou a navržena jejich optimalizace ke zkvalitnění výrobního procesu.

2. Laser

Slovo laser je akronym pro anglická slova: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Překlad těchto slov do českého jazyka zní: světlo zesílené stimulovanou emisí záření. Můžeme říci, že se jedná o optický zdroj elektromagnetického záření. Takovéto záření se vyznačuje monochromaticností a koherentností. [1,2]

2.1 Historie laseru

První optická zařízení vynalezli již staří Řekové. Ti pracovali se světelnými paprsky a jejich využití. Po staletí byly tyto poznatky neměnné a velmi strohé. V 17. století způsobil Sir Isaac Newton právě s tímto oboru zvrát, když se mu podařilo rozložit bílé světlo na spektrum barev, a to pomocí skleněného hranolu. S Newtonovým tvrzením, že světlo má částicový charakter nesouhlasil jeho holandský kolega Christiaan Huygens, který tvrdil, že podstata světla je ve vlnění. Jejich spor rozlouskl až téměř po třech stoletích německý fyzik Max K. E. L. Planck se svojí teorií, která potvrdila, že jak Huygens, tak i Newton měli pravdu. Planck touto teorií také položil základní kámen kvantové fyziky.

Další krok k objevu laseru udělal v roce 1917 německý teoretický vědec Albert Einstein, který jako první dokázal popsat princip stimulované emise. Tím byla rozšířena absorbce a spontánní emise o další jev. Na jeho výzkum navázal ruský fyzik Valentin A. Fabrikant, kterému se v roce 1939 podařilo zesílit elektromagnetické záření pomocí spontánní emise. V roce 1951 si nechal se svými ruskými kolegy F. A. Butajevovou a M. M. Vudynským patentovat metodu zesilování elektromagnetického záření (infračerveného, ultrafialového, viditelného záření a pásma radiových vln).

Ze získaných poznatků se jako první podařilo zesilovat záření v mikrovlnné oblasti. V roce 1952 na konferenci o radiospektroskopii informovali ruští vědci N. G. Basov a A. M. Prochorov o molekulárním svazkovém generátoru - MASER ("Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation"), tj. zesilování mikrovln pomocí stimulované emise záření. Se stejnou myšlenkou přišel i americký fyzik Ch. H. Townes, který se svými kolegy J. P. Gordonem a H. J. Zeigerem sestrojil první molekulární generátor a to v roce 1954. Sestrojení maseru dalo vznik novému

vědnímu oboru - kvantové elektronice. V roce 1964 dostali Basov, Prochorov a Townes společně Nobelovu cenu za vynález maseru. [1,2,8]

Šest let po vynalezení maseru byl americkým vědcem Theodorem Maimanem vydán článek o generování světla pomocí rubínové tyče. Byl tak vynalezen rubínový laser. V následujících letech šel vývoj laserů rychle dopředu.

- 1960 W. R. Bennett, D. R. Herriott a A. Javan sestrojili první plyný laser
- 1960 byl zkonstruován první vodíkový maser
- 1961 byl zkonstruován první polovodičový laser
- 1962 byl do Československé republiky dovezen první maser
- 1963 byl v Československé republice sestrojen první laser.



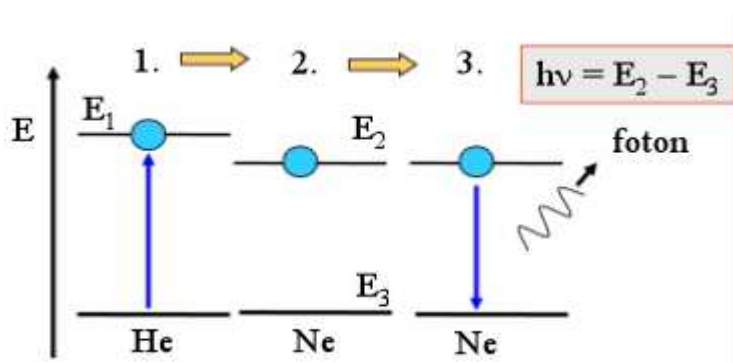
Obr. 1 - Vynálezce laseru Theodore Maiman [8]

2.2. Princip laseru

Laser je zdroj elektromagnetického záření, které je také označované jako laserový paprsek. Základními vlastnostmi laserového svazku je jeho extrémní monochromaticnost, malá divergence a vysoká hustota přenášené energie. Na rozdíl od světla přirozeného je světlo z laseru koherentní a homogenní.

Jádrem každého laseru je aktivní prostředí. V aktivním prostředí se musí nacházet prvek, který je schopen setrvávat v základním stavu (nižší energie) nebo v excitovaném stavu (vyšší energie). Po splnění této podmínky a vzájemném působení aktivního prostředí s budící energií, nastávají tyto děje:

- **Absorpce světla** - Je jev, při kterém atom (resp. molekula) v nižším energetickém stavu E_1 pohltí foton odpovídající frekvence ν a přejde do vyššího stavu.
- **Spontánní emise** - Vzniká jako samovolný jev v souladu se zachováním termodynamické rovnováhy. V tomto jevu atom přechází z horní energetické hladiny na dolní energetickou hladinu bez vnějšího působení.
- **Stimulovaná emise** - Tento jev má nejdůležitější význam pro funkci laseru. Jev může nastat při vzájemném působení excitovaného kvantového systému s elektromagnetickým zářením (fotonem). Frekvence fotonu (ν) se rovná rozdílu horní a dolní energetické hladiny ($E_2 - E_3$). Při tomto působení dochází k uvolnění excitační energie vyzářením fotonu. Energie fotonu je dána rovnicí: $h \cdot \nu = E_2 - E_3$ (kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ - Planckova konstanta). Vlastnosti vyzářeného fotonu jsou pak stejné jako fotonu, kterým byla emise stimulována.



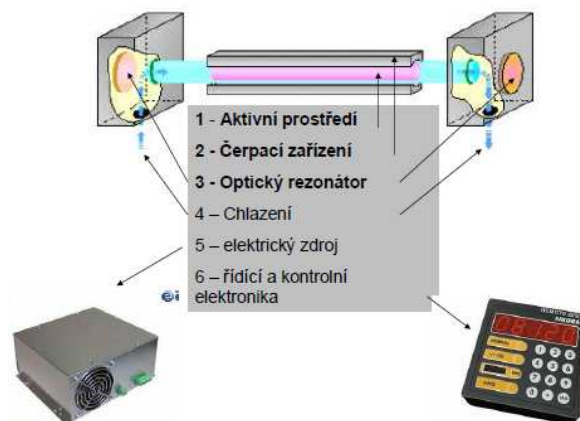
Obr. 2 - Tříhladinový He-Ne laser [11]

Vznik stimulované emise je podmíněn excitací atomů aktivního prostředí. Aby tento jev mohl nastat, musí být daný systém dotovaný energií. K dotování systému slouží buzení, které se provádí pomocí laseru, výbojky nebo třeba EM výbojem. Pomocí buzení dochází k excitování populace do horní energetické hladiny. Tato situace nesplňuje podmínku rovnovážného rozdělení a je základem pro vznik stimulované emise.

Vložením aktivního prostředí do rezonátoru dostaneme zesílení laserového svazku a vznik nových synchronizovaných fotonů. V rezonátoru pak dochází k exponenciálnímu růstu fotonů o frekvenci ν , která se rovná rozdílu horní a dolní energetické hladiny ($E_2 - E_1$), které průchodem přes částečně propustné zrcadlo rezonátoru vytvářejí laserový svazek. [9,10,11]

2.3. Konstrukce laseru

Lasery jsou díky své konstrukci složitá zařízení, která obsahují velmi mnoho dílů. Mezi ty nejdůležitější patří aktivní prostředí, optický rezonátor, budící zařízení a chladicí zařízení. Dalšími díly mohou být například nelineární krystal pro volbu vlnové délky, kalibrační zařízení nebo měřič výkonu. [9,10,11]



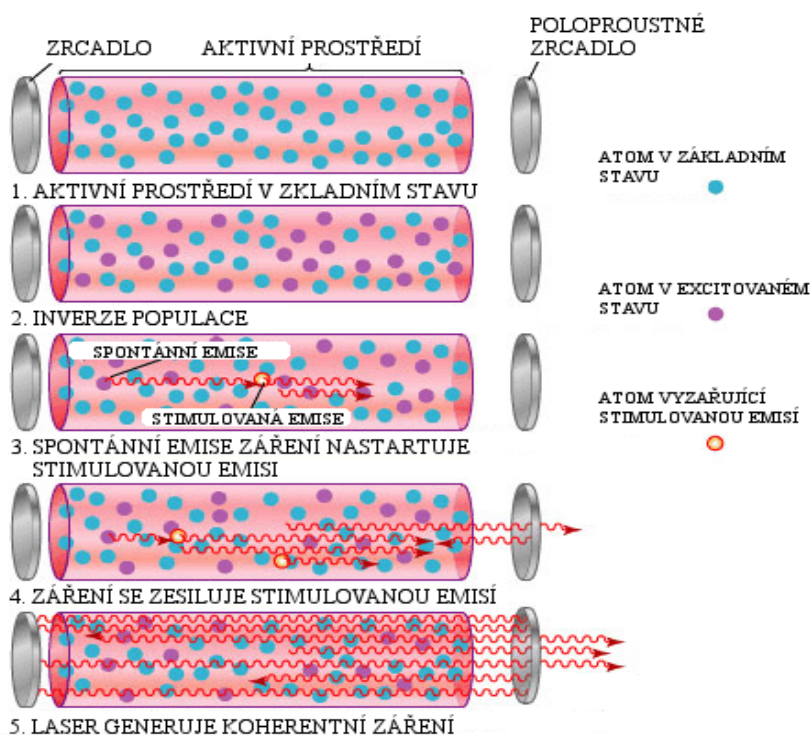
Obr. 3 - Konstrukce laseru [8]

2.3.1. Aktivní prostředí

Aktivní prostředí je hlavní součástí laseru, které obsahuje oddělené energetické hladiny elektronů. Toto prostředí je schopné během stimulované emise násobit světelnou energii. Jako aktivní látka se využívá směs plynů, monokrystaly, polovodičové multivrstvy, volné elektrony nebo polovodič s P-N přechodem. [9,10,11]

2.3.2. Optický rezonátor

Optický rezonátor slouží k udržení fotonů uvnitř aktivního prostředí, ty oscilují mezi zrcadly rezonátoru. Opakovaným průchodem fotonů aktivním prostředím strhávají excitované atomy (molekuly) do základního stavu. Tento rezonátor tvoří dvojice rovnoběžně umístěných zrcadel, které ohraničují aktivní prostředí. Tvar zrcadel se liší podle druhu rezonátoru, stačí když soustava ploch zajistí, že foton zůstane v původní dráze. Existují lasery, které obsahují kruhové, sférické či vláknové rezonátory. [9,10,11]



Obr. 4 - Zesilování laserového svazku [9]

2.3.3. Budící zařízení

Budící zařízení přivádí energii atomům (molekulám) aktivního prostředí. Pomocí této energie přechází atomy (molekuly) z nižší energetické hladiny do vyšších energetických hladin. Aktivní prostředí, vybuzení na vyšší, než základní energetické hladiny je hlavní podmínka vzniku stimulované emise. Jako budící zařízení se nejčastěji používá elektrický proud, chemická reakce nebo světelná výbojka. [10,11]

2.3.4. Chladicí zařízení

Chladicí zařízení slouží k odvodu zbylé energie, která se nepřeměnila na záření laserového svazku, ale na teplo. Chladicí výkon tohoto zařízení se odvíjí od výkonu laseru. U laseru bývá často používáno chlazení vodou. [11]

2.4. Vlastnosti laserového záření

Laserové záření se svými vlastnostmi liší od ostatních zdrojů elektromagnetického záření. Mezi tyto vlastnosti patří koherentnost, monochromaticnost, směrovost a módová struktura. [6,7,10]

2.4.1. Koherentnost, monochromaticnost, směrovost

Jednou z hlavních vlastností, kterou laser má je koherentnost záření. Tato vlastnost zajišťuje, že fotony mají stejnou frekvenci, fázi i směr kmitání.

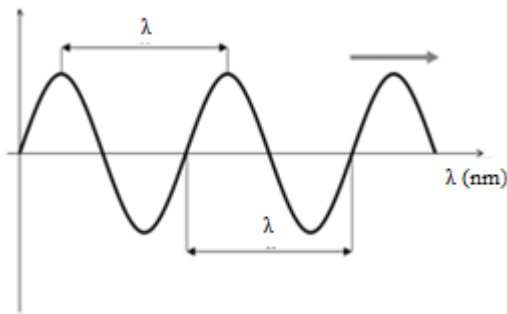
Monochromaticnost (jednobarevnost) je vlastnost, která je odvozena přímo z podstaty stimulované emise, kde má svazek přesně danou vlnovou délku a tudíž jednu barvu a danou šířku spektra.

Vysoká směrovost svazku vyplývá z vlastnosti rezonátoru, ve kterém jsou generovány fotony. Tyto fotony se šíří pouze ve směru stability rezonátoru nebo ve směrech, které se od ní málo odchyľují. [5,10]

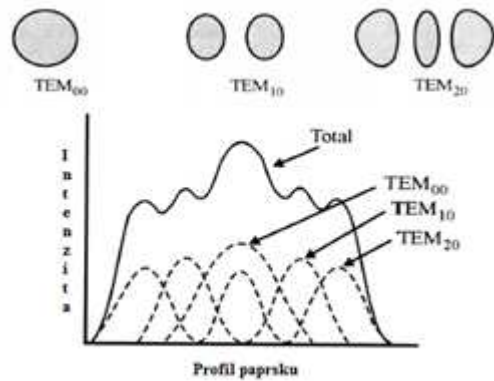
2.4.2. Vlnová délka, mód paprsku

Vlnová délka (délka vlny) označuje vzdálenost dvou nejbližších bodů postupného periodického vlnění, které kmitají ve fázi. Je dána vlastnostmi aktivního prostředí (využívaných energetických hladin aktivního prostředí) a nastavením rezonátoru

Mód paprsku je definován jako rozložení intenzity laserového záření v příčném profilu svazku. Vliv na tyto módy má nastavení zrcadel v rezonátoru, ale především jeho geometrická konstrukce. U laserů se vyskytuje nespočet módů (TEM_{00} , TEM_{10} , TEM_{01} , TEM_{20} , atd.). Ve strojírenství se nejčastěji využívá mód TEM_{01} , který se používá k vrtání a řezání. [3,5]



Obr. 5 - Vlnová délka [3]

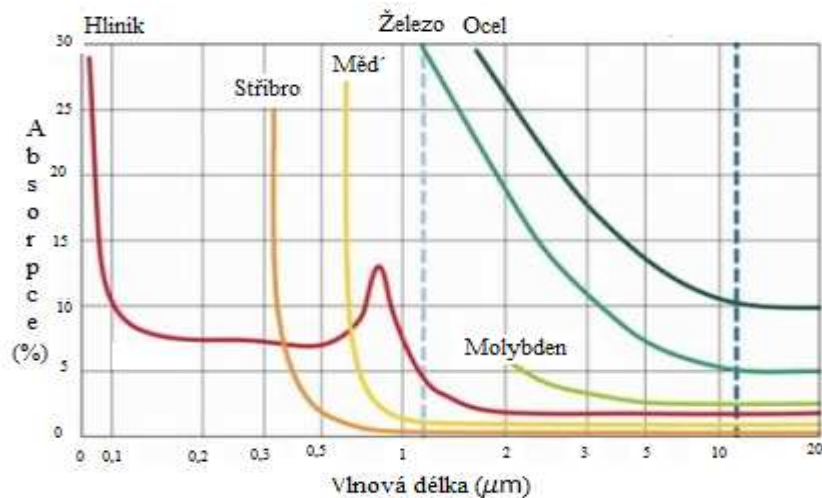


Obr. 6 - Módová struktura

2.4.3. Polarizace, absorpce

Polarizace laserového svazku se odvíjí od náklonu Brewsterova okénka, které se nachází v místě výstupu svazku z rezonátoru. Ve strojírenství má směr polarizace velký vliv na kvalitu řezu. Nejčastěji se používá polarizace kruhová, kde stopa řezu nezávisí na směru řezu. Při řezání, kde nedochází ke změně směru řezu se využívá lineární polarizace, u které můžeme využít vysoké řezné rychlosti.

Na velikosti absorpce dopadajícího laserového svazku má vliv hned několik parametrů. Mezi tyto parametry patří vlnová délka svazku, teplota řezaného materiálu, úhel dopadu paprsku, drsnost povrchu materiálu, ale zejména chemické vlastnosti daného materiálu. [5]



Obr. 7 - Závislost absorpce na vlnové délce

2.5. Rozdělení laserů

Lasery se dělí do různých skupin podle různých měřítek pro srovnávání. Nejčastěji však podle:

- aktivního prostředí
- vlnové délky
- režimu práce
- bezpečnostní třídy
- výkonu
- využití.

2.5.1. Rozdělení podle aktivního prostředí

AKTIVNÍ MATERIÁLY	TYPY LASERŮ		BUZENÍ
dielektrické krystaly, skla	pevnolátkové lasery		optické
kapaliny, organická barviva	kapalinové lasery		
plyny, plynové směsi	plynové lasery	fotodisociační	elektrickým výbojem
		atomové	
		iontové	
		molekulární	
		excimerové	elektronovým svazkem
		elektroionizační	expanzí stlačeného plynu
		plynové-dynamické	chemickou reakcí
vlastní polovodiče	polovodičové lasery		elektronovým svazkem
příměsové polovodiče			elektronovým proudem

Tabulka 1 - Rozdělení laseru

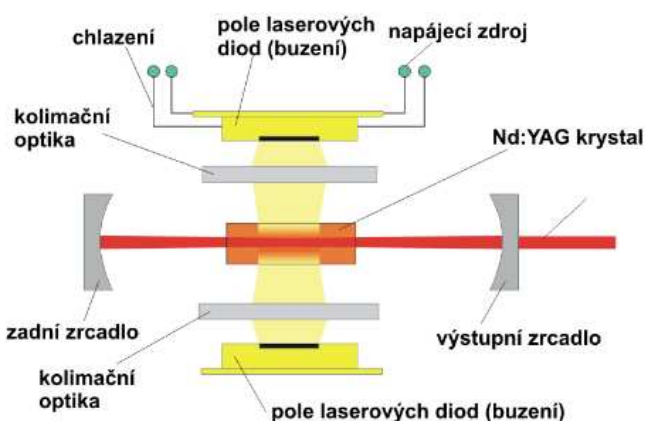
2.5.1.1. Pevnolátkové lasery

Aktivním prostředím se u pevnolátkových laserů používá pevná opticky propustná látka - aluminát, fluorid, fosfát, granát, krystal, oxid, sklo a keramika. Tyto látky jsou pak obohacené o aktivační prvky. Jako aktivační prvek se nejčastěji používá ionty vzácných zemin (neodym, erbium, thulium a ytterbium).

LASER	VLNOVÁ DÉLKA (nm)	SPEKTRÁLNÍ OBLAST	VYUŽITÍ
Rubínový	694,3	červená	Holografie
Nd:YAG	1 064,1	IR	Litografie, chirurgie
Yb:YAG	1 030	IR	Svařování, řezání
Titan-safírový	690 - 1 000	červená, IR	Spektroskopie
Alexandritový	700 - 818	červená, IR	Řezání, žíhání
Neodymový	1 062,3	IR	Vysokoenergetické pulzní systémy

Tabulka 2 - Pevnolátkové lasery [12]

Nejpoužívanější pevnolátkové lasery jsou v dnešní době Nd:YAG laser. Tento laser se používá ve strojírenství k vrtání, sváření a řezání. Dále v radarové technice, spektroskopii a ve zdravotnictví. Ve zdravotnictví se u Nd:YAG laseru využívá kontinuální (skalpel v chirurgii) i pulzní (oční mikrochirurgie) režim. [2,6,7]



Obr. 8 - Konstrukce diodami čerpaného Nd:YAG laseru [6]

2.5.1.2. Kapalinové lasery

Kapalinové lasery jsou tvořeny roztoky různých organických barviv nebo metalo-organickými sloučeninami dopovanými ionty vzácných zemin. Mezi tyto vzácné zeminy patří samarium, europium a ytterbium. Různými kombinacemi lze podle tzv. nelineární optiky vytvořit záření o všech vlnových délkách v rozsahu od 300 nm do 1500 nm. Kapalinové lasery mají krátkou životnost způsobenou rozkladem aktivního prostředí světlem a teplem. Účinnost kapalinových laserů je řádově desítky procent. Výhodou kapalinových laserů je snadné chlazení, homogenita aktivního prostředí a stabilita. Kapalinové lasery umožňují naladit přesnou vlnovou délku, díky této vlastnosti se nejvíce vyskytují ve zdravotnictví a ve spektroskopii. [2,6,7]

LASER	VLNOVÁ DÉLKA (nm)	SPEKTRÁLNÍ OBLAST	VYUŽITÍ
Kumarin C30	504	zelená	Chirurgie
Rhodamin 6G	570 - 650	žlutá, oranžová, červená	Dermatologie

Tabulka 3 - Kapalinové lasery [12]

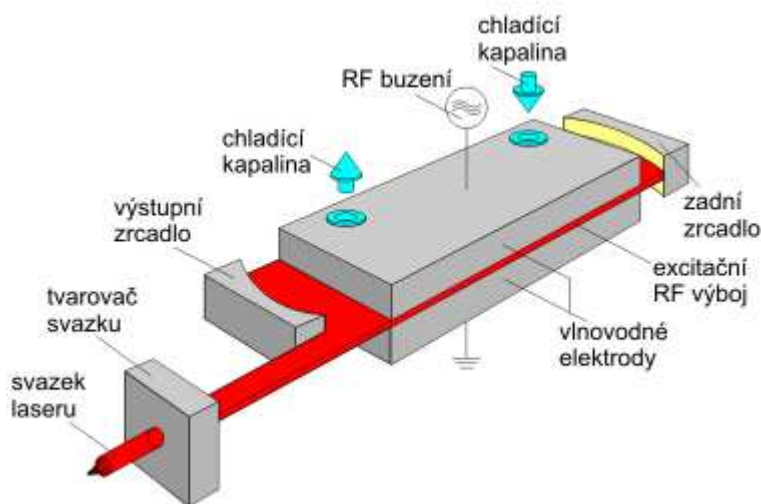
2.5.1.3. Plynové lasery

Plynové lasery mají aktivní prostředí tvořené atomy, ionty nebo molekulami plynů jako jsou helium, neon, jód nebo dusík. Rozsah plynových laserů je obrovský. Tyto lasery dokáží pracovat v kontinuálním i pulzním režimu. Nejčastěji probíhá buzení za pomoci elektrického výboje v zředěném plynu, někdy se však využívá optického buzení. Výhodou plynových laserů je homogenní aktivní prostředí, které zaručuje vysokou účinnost a velký výkon. Nevýhodou je pak časté přehřívání.

LASER	VLNOVÁ DÉLKA (nm)	SPEKTRÁLNÍ OBLAST	VYUŽITÍ
Jódový	342 - 612 - 1 315	UV, oranžová, IR	Termojaderná syntéza
Argonový	488 - 514	modrá, zelená	Spektroskopie
Dusíkový	337	UV	Generace UV záření
Excimerový	193 - 351	UV	Fotolitografie
CO ₂	10 600	IR	Řezání, svařování

Tabulka 4 - Plynové lasery [12]

Nejrozšířenějším plynným laserem je CO₂ laser, který má využití ve zdravotnictví a strojírenství. Zvláštní skupinu tvoří lasery excimerové. U těchto laserů je aktivní prostředí tvořeno molekulami dvou vzácných plynů (fluor - krypton, argon - krypton). Tyto lasery našly uplatnění při mikroobrábění keramických materiálů, čištění povrchů strojních součástí, vrtání děr o malém průměru (< 10 μm) a při obrábění diamantů. Na světelné efekty se nejvíce hodí argonový laser s modrým nebo zeleným paprskem. [2,6,7]



Obr. 9 - Konstrukce CO₂ laseru [6]

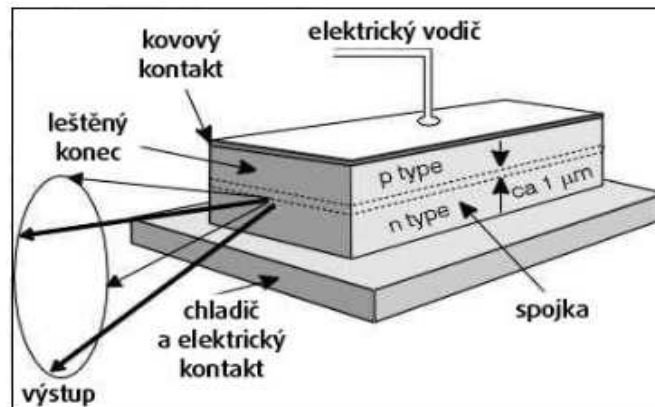
2.5.1.4. Polovodičové lasery

Polovodičové lasery jsou nejmladší a zároveň nejrozšířenější skupinou laserů. Základem polovodičových laserů je laserová dioda s velmi malými rozměry. Aktivní prostředí je zde tvořeno polovodičovým materiálem obsahující volné nosiče náboje. V přechodové vrstvě mezi polovodiči typu P a N dochází k přechodu atomu na vyšší energetickou hladinu za pomoci elektrického proudu procházejícího diodou. Tento atom při návratu na nižší energetickou hladinu vyzáří energii (teplo, světlo).

LASER	VLNOVÁ DÉLKA (nm)	SPEKTRÁLNÍ OBLAST	VYUŽITÍ
GaN	405	modrá	BLU-RAY disky
InGaAIP	630 - 685	červená	Zdravotnictví
GaAs	650 - 840	červená, IR	Laserové tiskárny
GaAlAS	670 - 830	červená	Telekomunikace

Tabulka 5 - Polovodičové lasery [12]

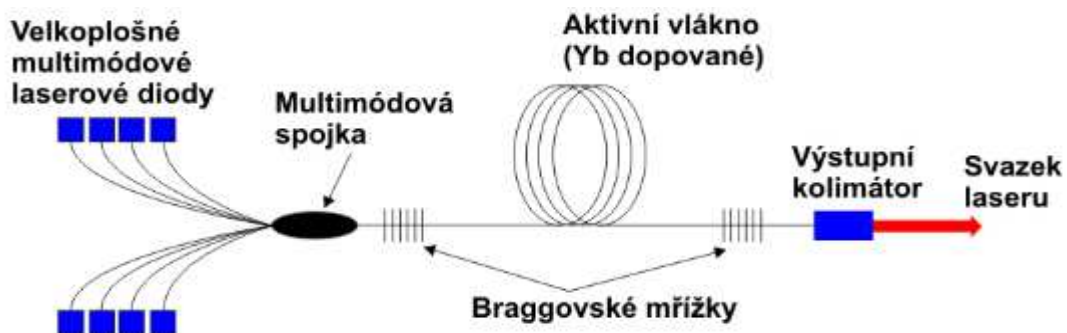
Výhodou laserových diod jsou malé rozměry, na druhé straně je nevýhodou velká rozbíhavost laserového svazku. Účinnost laserových diod je vyšší než u ostatních skupin laserů a dosahuje až k 50 %. Výkon laserových diod se dá regulovat změnou budícího elektrického proudu. Největší uplatnění našli laserové diody ve výpočetní technice. [2,7]



Obr. 10 - Konstrukce GaN laseru [6]

2.5.1.5. Vláknové lasery

U vláknových (fiber) laserů je aktivní prostředí tvořeno dlouhým optickým vláknem dopovaným ytterbiem. Buzení je provedeno pomocí laserových diod navázaných přes optickou spojku do aktivního vlákna. Ve vláknových laserech jsou místo zrcadel tzv. Braggovské mřížky. Tyto lasery dokážou pracovat v kontinuálním, pulzním i kvazipulzním režimu. Výhodou vláknových laserů je vysoká účinnost (30 - 35%), robustnost, jednoduchost (celý laser je tvořen optickým vláknem), obrovská životnost a vysoká kvalita laserového svazku. Vláknový laser má od ostatních skupin nejnižší provozní náklady, nulové náklady na údržbu a hlavně modularitu, která je u těchto laserů unikátní. Laser je tvořen tzv. laserovými moduly a právě modularita zajišťuje navazování těchto modulů na sebe čímž se navyšuje výkon laseru. [2,6,7]



Obr. 11 - Konstrukce vláknového laseru [6]

2.5.2. Rozdělení podle vlnové délky

Ve strojírenství se lasery dělí podle spektrální oblasti ve které pracují, a to na ultrafialové, ve viditelné oblasti a na blízké a daleké infračervené. Tyto lasery svou vlnovou délkou odpovídají rozsahu od 0,4 μm do 10,6 μm . [7]

2.5.3. Rozdělení podle režimu práce

Režim práce laseru je možný v kontinuálním nebo pulzním režimu. U některých laserů lze dokonce pracovat i v kvazipulzním režimu. U pulzního režimu je možné dosáhnout velké hustoty energie ke zvýšení absorpce záření pro materiály s velkou odrazivostí. Díky krátké době působení svazku s materiálem se snižuje ohřev materiálu. V kontinuálním režimu nedochází k tak radikální akumulaci energie, čímž nenastávají výkyvy výkonu systému. [7]

2.5.4. Rozdělení podle bezpečnosti třídy

Mnoho laserů pracuje s energií která je pro lidské oko nebo tělo nebezpečná. Díky koherentnosti laseru je rozptyl velmi malý a proto může být světlo soustředěno na velmi malou plochu sítnice. Při zásahu sítnice touto energií dochází k přehřátí a může pak dojít i k trvalému poškození zraku. Lasery proto rozdělujeme do čtyř bezpečnostních tříd:

Třída I.

- možnost trvalého pohledu do laseru bez následku

Třída II.

- viditelné kontinuální záření, před poškozením oka chrání mrkací reflex

Třída III.

a) viz. Třída II + poškození oka při použití optiky

b) riziko poškození oka, nutnost používat ochranné pomůcky, emise je zde menší než 0,5 W

Třída IV.

- viz. Třída III b) + emise zde přesahuje hranici 0,5 W

3. Využití laseru ve strojírenství

Poprvé se laser ve strojírenství objevil ke konci 60. let 20. století. Dnešní lasery od té doby prošly mnoha zdokonaleními s cílem zvýšení kvality a produktivity procesu. Díky těmto zdokonalením se snížila cena výrobních nákladů, je potřeba méně vstupních surovin, zvýšila se úspora energie a produktivita práce. Tyto lasery umožňují laserové svařování s nižšími provozními náklady než ostatní metody, atermální mikroopracování materiálu nebo metodu dálkového řezání. Ve strojírenství se klade důraz hlavně na parametry, jako jsou tepelná vodivost, absorpce a odrazivost materiálu. Nejčastější využití má pak laser v těchto technologiích:

- gravírování
- leštění a čištění
- kalení
- povlakování
- navařování
- svařování
- vrtání
- řezání.

3.1. Laserové gravírování

Gravírování je technologie, která v dnešní době nahradila ruční rytí. Při této metodě se za pomoci odebrání tenké vrstvy materiálu vytváří loga, ornamenty či nápisy. Pro laserové gravírování se nejvíce v praxi využívá CO₂ laser, který dokáže gravírovat organické materiály, jako jsou kovy, dřevo, sklo, plasty i kůže. Laserové gravírování od ostatních gravírovacích metod vyniká trvalostí, flexibilitou, rychlostí a přesností. Hloubka gravírování je pak až 1 mm. [4]

3.2. Laserové leštění a čištění

Laserové leštění spočívá v přetavení povrchu materiálu, díky kterému vzniká vyhlazená vrstva o tloušťce 100 μm . Uplatnění zde našly pevnolátkové lasery (Nd:YAG, Yb:YAG), které pracují v kontinuálním nebo pulzním režimu. Laserovým leštěním lze dosáhnout snížení drsnosti z 3 μm na 0,1 μm . Nejčastěji se leští kovy, plasty, pryže a skla. S CO₂ laserem lze dokonce leštit i povrch skleněných čoček.

Laserové čištění spočívá v použití mikrosekundových až nanosekundových pulzů. Díky těmto krátkým pulzům dochází k zahřátí a následnému odpaření nežádoucích částic, zároveň však nedochází k zahřívání povrchu materiálu tak, aby změnil svoji strukturu. Laserové čištění slouží k odstraňování starých nátěrů, rzi nebo k odmašťování povrchu. [4,13]

3.3. Laserové kalení

Laserové kalení povrchu je jedna z nejnovějších metod tepelného zpracování materiálu, která zvyšuje životnost výrobků. Princip se zakládá na působení laserového paprsku na povrchovou vrstvu materiálu. Tato vrstva se zahřeje na teplotu těsně pod bodem tání. V tomto okamžiku dochází ve stavbě materiálu k tzv. austenitizaci. Laserové kalení je tzv. samokalení, kdy se povrch zahřívá ve směru posuvu paprsku a zahřátá místa se pak rychle zchladí okolním materiálem. Není tedy potřeba přivádět na zahřátý povrch chladicí emulzi. Oproti klasické metodě kalení se zahřívá jen povrch výrobku. Pro laserové kalení se využívají CO₂ lasery a pevnolátkové lasery. Ovšem nejvíce se pak vyplatí použití polovodičových laserů, u kterých odpadá problém s profilem svazku. Výsledkem kalení je povrch s vysokou kvalitou a tvrdostí. V dnešní době je hloubka překalené vrstvy do 2 mm. Nejčastěji se pak tato technologie využívá ke kalení funkčních ploch hřídelí, ozubených kol, hran střížných nástrojů a forem pro lisování. [4,13]

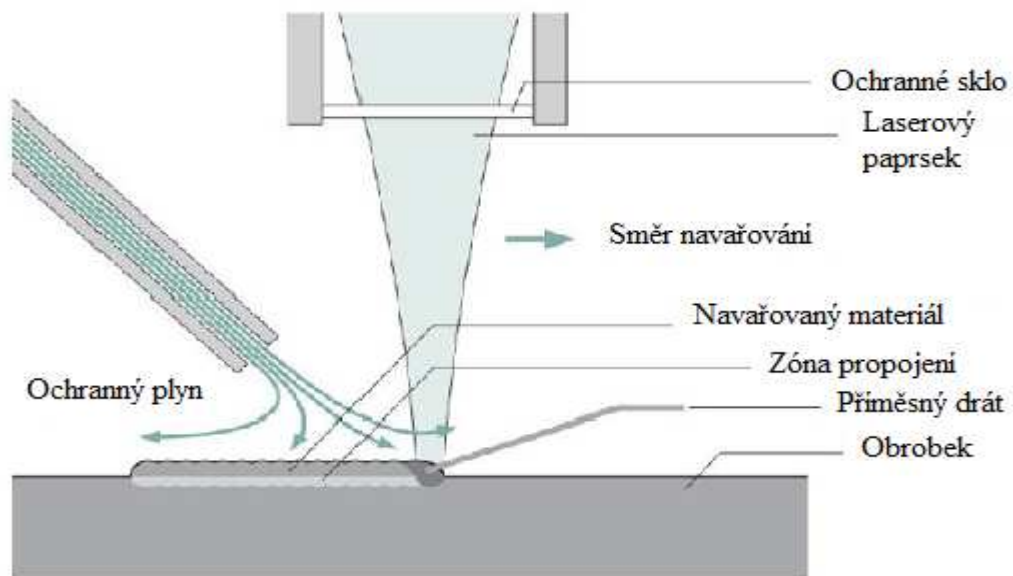
3.4. Laserové povlakování

Metoda laserového povlakování slouží k nanesení materiálů, který zvyšuje odolnost výrobku proti korozi a opotřebení. Nanáší se kovové, keramické, plastové i kompozitní povlaky. Princip této metody spočívá v nanášení materiálu ve formě prášku na potřebnou plochu. Působením laserového záření dojde k natavení prášku a vznikne metalurgická vazba se základním materiálem. Tloušťka jedné vrstvy povlaku bývá od 0,1 mm do 1 mm a lze je vrstvit na sebe až do tloušťky několika cm. [4,13]

3.5. Laserové navařování

Laserové navařování se nejčastěji používá k opravě strojních součástí. Na opravovanou část je navařen chybějící materiál, který je shodný s materiálem obrobku.

Za pomoci laserového záření nastává propojení těchto dvou materiálů. Výsledkem je pak prodloužená životnost a finanční úspora za nákup nových součástí. [4,13]



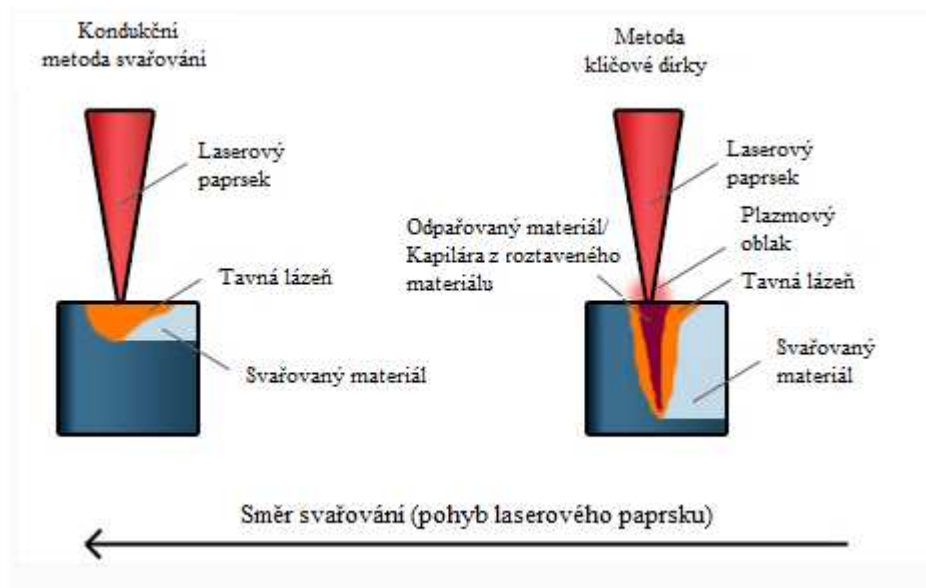
Obr. 12 – Princip laserového navařování [14]

3.6. Laserové svařování

Laserové svařování se dělí do dvou metod (kondukční, penetrační). Kondukční metoda svařování, někdy také nazývaná jako svařování pomocí vedení tepla, je metoda při které se materiál taví pomocí laserového paprsku. Výhoda této metody spočívá ve vysoké rychlosti svařování a malé hloubce průvaru. Penetrační metoda bývá také někdy nazývána jako metoda klíčové dírky. Při této metodě se za pomoci laserového záření odpařuje materiál. Během odpařování vzniká plazma a dochází k hlubokému průvaru materiálu. Laserový paprsek vytvoří kapiláru, jejíž stěny jsou tvořeny roztaveným materiálem a plyn vycházející z této kapiláry brání jejímu uzavření.

Pro laserové svařování se používá speciální svařovací hlava. Tato hlava je tvořena čočkami pro fokusaci svazku a tryskami přivádějícími ochranné plyny. Mezi nejčastěji využívané plyny patří argon, dusík, helium a oxid uhličitý. Význam těchto plynů spočívá v ochraně tavné lázně před oxidací a také zabraňuje odlétajícím částicím z tavné lázně poškodit fokusační optiku. Speciálním druhem svařování je dálkové svařování u kterého se nepoužívá svařovací hlava. Laserový paprsek se fokusuje na velmi velkou vzdálenost a jeho pohyb je zajištěn pohyblivými zrcadly.

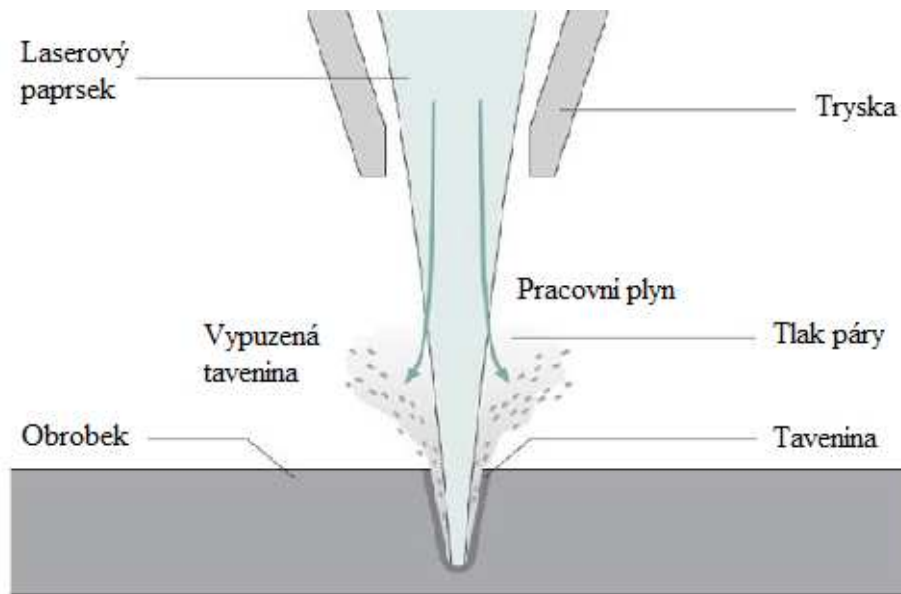
Výhodou laserového svařování oproti ostatním svařovacím metodám je minimální tepelné ovlivnění okolního materiálu, který má pak jemnější strukturu a nižší zbytkové pnutí. Svařují se materiály jako hliník, měď, titan a nerezové kovy. Nebezpečí může nastat u materiálů s vysokou odrazivostí, kde hrozí zničení fokusační čočky odraženým laserovým paprskem. Při svařování bez použití přídavného materiálu by neměla mezera mezi svařovanými materiály překročit 25 % průměru pasu svazku. Pokud k tomu dojde vznikají ve sváru vruby. Zabránit vzniku těchto vrubů se dá pomocí použití přídavného materiálu ve formě drátu. Výsledkem laserového svařování je úzký a hluboký svár, který má vysokou kvalitu, je bez trhlin, pórů a nečistot. [4,13]



Obr. 13 – *Metody laserového svařování*

3.7. Laserové vrtání

Intenzita laserového svazku pro laserové vrtání je mnohem vyšší než u ostatních aplikací. Využití zde našli pulzní lasery, nejvíce pak Nd:YAG laser. Pomocí krátkých impulsů s vysokou hustotou výkonu je do obrobku dodávána energie, která taví a odpařuje materiál. Při odpařování se zvyšuje objem materiálu ve vrtaném otvoru a zároveň zde vzniká přetlak. Tento přetlak páry pak vypudí roztavený materiál z otvoru ven. Specifické je pak vrtání pomocí laseru s ultrakrátkými impulzy v rozsahu od desítek pikosekund až po stovky femtosekund. Materiál se zde odpařuje díky laserové studené ablací přímo z pevného skupenství bez roztavení materiálu. [14]



Obr. 14 – *Princip laserového vrtání* [14]

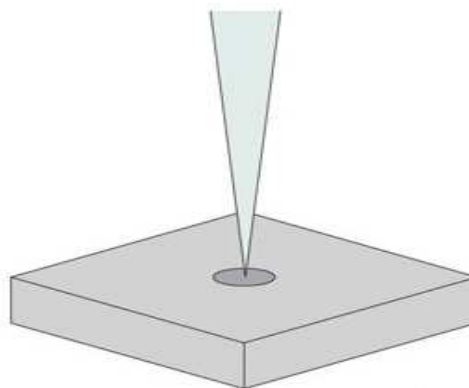
Během let se ze základního principu vyvinulo několik nových metod vrtání.

Nejčastěji se pak vrtá pomocí těchto metod:

- Vrtání jednotlivými impulzy
- Nárazové vrtání
- Trepanační vrtání
- Spirálové vrtání.

3.7.1. Vrtání jednotlivými impulzy

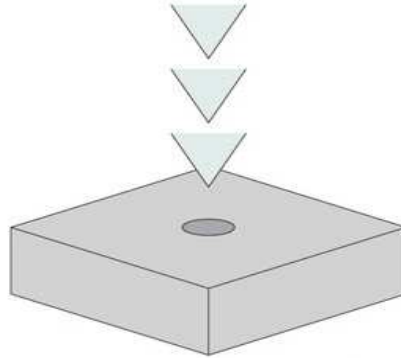
Vrtání jednotlivými impulzy je nejjednodušší metoda, při které otvor vytvoří jediný impulz s vysokou energií. Touto metodou lze velmi rychle vytvořit velké množství otvorů. [14]



Obr. 15 – *Metoda vrtání jednotlivými impulzy* [14]

3.7.2. Nárazové vrtání

Metodou nárazového vrtání vzniká otvor více impulzy laseru s nízkou energií. Výhodou této metody vrtání je hlubší a přesnější otvor. Nárazové vrtání navíc umožňuje vrtat otvory o menších průměrech (od $10\mu\text{m}$). [14]



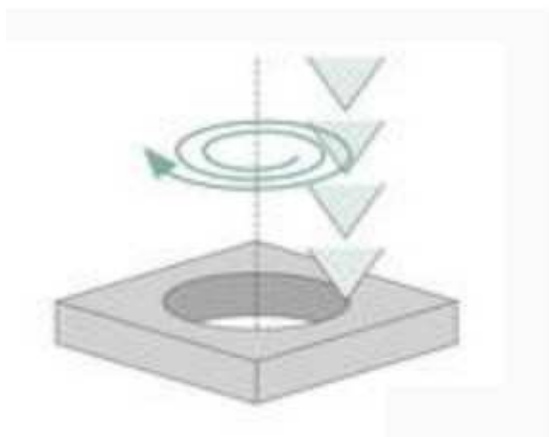
Obr. 16 – *Metoda nárazového vrtání* [14]

3.7.3. Trepanační vrtání

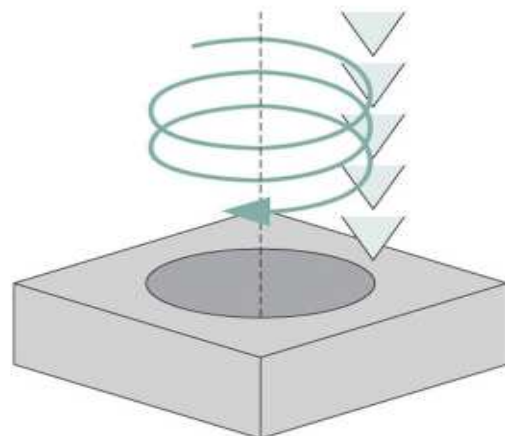
Při trepanaci vzniká otvor působením několika impulzy laseru. Laser nejprve vyvrtá počáteční otvor pomocí nárazového vrtání. V následujícím kroku se zvětší počáteční otvor tím, že se laser pohybuje nad obrobkem v několika zvětšujících se kruhových drahách. Odtavený materiál při tom odpadá z otvoru směrem dolů. [14]

3.7.4. Spirálové vrtání

Na rozdíl od trepanační metody se nevyvrtá počáteční otvor. Laser se pohybuje nad materiálem již při prvních impulzech v kruhové dráze. Materiál zde vystupuje směrem nahoru. Laser se propracovává do hloubky ve tvaru točitého schodiště. Po proniknutí laseru materiálem jsou přidány další okruhy, které začišťují okraje otvoru. Výsledkem pak jsou velké a hluboké otvory o vysoké kvalitě. [14]



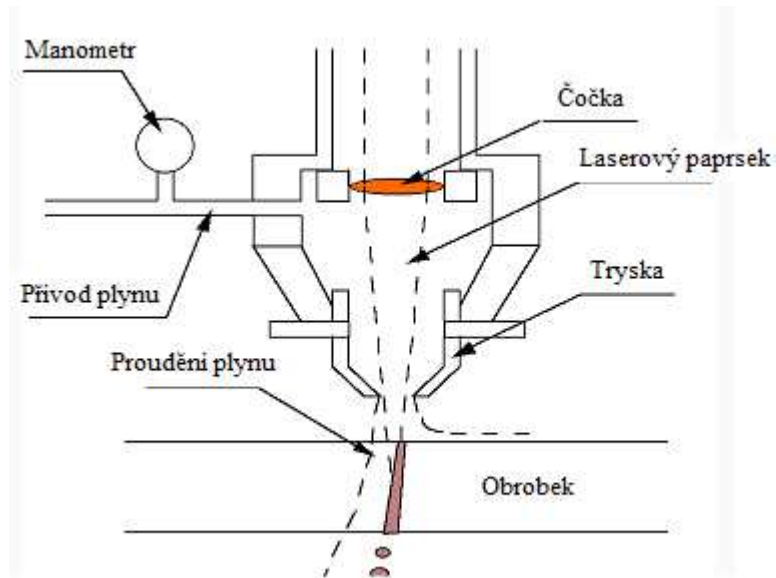
Obr. 17 – *Metoda trepanačního vrtání* [14]



Obr. 18 – *Metoda spirálového vrtání* [14]

4. Laserové řezání

Laserové řezání (dělení) je nejčastěji využívanou aplikací laserů ve strojírenství. Výhodou dělení materiálu laserem je malá šířka řezu, přesnost, kolmost, vysoká řezná rychlost, vysoká kvalita řezu a nízké tepelné ovlivnění řezaného materiálu. Ve strojírenství existují dva typy dělení materiálu. První typ spočívá v přerezávání a používá se na kovové materiály do tloušťky 20mm. Ve druhém případě se u křehkých materiálů (sklo, keramika) vytvoří drážka a následně se provede kontrolovaný lom. [15]



Obr. 19 – Princip laserového řezání [15]

4.1. Metody laserového řezání

Ve strojírenství se pak řezání dělí do těchto metod:

- Oxidační řezání
- Protavování
- Sublimační řezání
- Orýsování.

4.1.1. Laserové oxidační řezání

Při této metodě se materiál pomocí laseru zahřeje na zápalnou teplotu a spálí se pomocí aktivního plynu. Exotermické reakční teplo vzniklé hořením způsobí snížení odrazivosti povrchu. Snížená odrazivost se projeví na zvýšené řezné rychlosti. Samotný proces řezání je pak výsledkem exotermické reakce materiálu s aktivním plynem, kterým bývá kyslík za podpory ohřevu laserovým zářením. [4]

4.1.2. Laserové protavování

Laserové protavování je metoda u které se pomocí fokusace laserového paprsku do ohniska zahřívá materiál nad teplotu tavení. Potom se pomocí tlaku působícího asistenčního plynu odstraní roztavený materiál z řezné spáry. U hořlavých materiálů (PVC) se jako asistenční plyn používá argon nebo dusík. Tyto plyny zabraňují vzplanutí a ohoření řezných hran. Výhodou této metody je nízká spotřeba energie a vysoká řezná rychlost. Nevýhodou jsou znatelné stopy po odstraňovaném materiálu. [4]

4.1.3. Laserové sublimační řezání

Metoda sublimačního řezání spočívá v zahřátí materiálu na teplotu při které se začne sublimovat. Vzniklé výpary jsou posléze odstraněny tlakem interního plynu. Výhodou je malá šířka řezu a jeho vysoká kvalita. Nevýhodou této metody je vysoká spotřeba energie, která je vyšší než u ostatních metod. [4]

4.1.4. Laserové orýsování

Princip této metody spočívá ve vytvoření vrypu (drážky) v materiálu. Důsledkem této drážky je zvýšení lokálního napětí, které dovoluje provedení kontrolovaného lomu. Tato metoda našla své využití při řezání křehkých materiálů (skla, keramiky). [4]

4.2. Asistenční plyny pro laserové řezání

Pro laserové řezání se používá dvou typů plynu (aktivního, inertního). Při použití aktivního plynu je řezání doplněno o další zdroj energie (exotermickou reakci). Výsledkem této reakce je zvýšení řezné rychlosti. Řezání s pomocí inertního plynu je nejrozšířenějším druhem dělení materiálu. Plyn se zde využívá k odstranění odpařených nebo roztavených částí materiálu. V porovnání s aktivním plynem je zde vyšší kvalita řezu, ale nižší řezná rychlost. Ve strojírenství se pak nejčastěji vyskytují plyny jako argon, dusík nebo kyslík. [16]

4.2.1. Argon - Ar

Ve strojírenství se argon používá k řezání reaktivních materiálů (titan, zirkon), u kterých je nezbytné použití inertního plynu. Argon brání přístupu okolního vzduchu k řezným plochám, aby nedocházelo k chemickým reakcím. U vysoce reaktivních materiálů je nutné používat komoru s ochranou argonovou atmosférou. Spotřeba tohoto plynu je ve strojírenství od 50 do 150 litrů za minutu. Argon se dodává buď stlačený v lahvích a nebo v kapalném stavu do stacionárních zásobníků. [16]

4.2.2. Dusík - N₂

Dusík našel využití při řezání nerezových ocelí, hliníku a vysoce legovaných ocelí. Pro vyšší kvalitu řezných hran a minimální chemické ovlivnění je potřeba použít dusík o vysoké čistotě (99,99%). Během procesu dělení za působení dusíku nedochází k oxidaci materiálu. Tím je dán základ pro zachování korozivzdornosti u nerezových ocelí nebo u nízkolegovaných ocelí s protikorozní vrstvou zinku. Tlak plynu během řezání musí být vyšší jak 10 barů, pak je zajištěn kvalitní řez bez otřepů na řezné hraně. U dusíku platí, že se zvyšující tloušťkou materiálu se zvyšuje i tlak plynu během řezu. Dusík se skladuje v lahvích nebo ve stacionárních zásobnících při tlaku, který musí být vlivem tlakových ztrát vyšší o 5-10 barů než je potřeba pro řezání. [16]

4.2.3. Kyslík - O₂

Řezání s pomocí kyslíku se používá při oxidačním řezání pro nízkolegované a nebo nelegované oceli. V porovnání s dusíkem je zde vyšší řezná rychlost. Vliv na řeznou rychlost má čistota kyslíku, která je ve strojírenství 99,95%. Oproti dusíku je tlak pro řezání tenkých materiálů kolem 5 barů a pro silnější materiály se pak tlak pohybuje kolem 1 baru. [16]

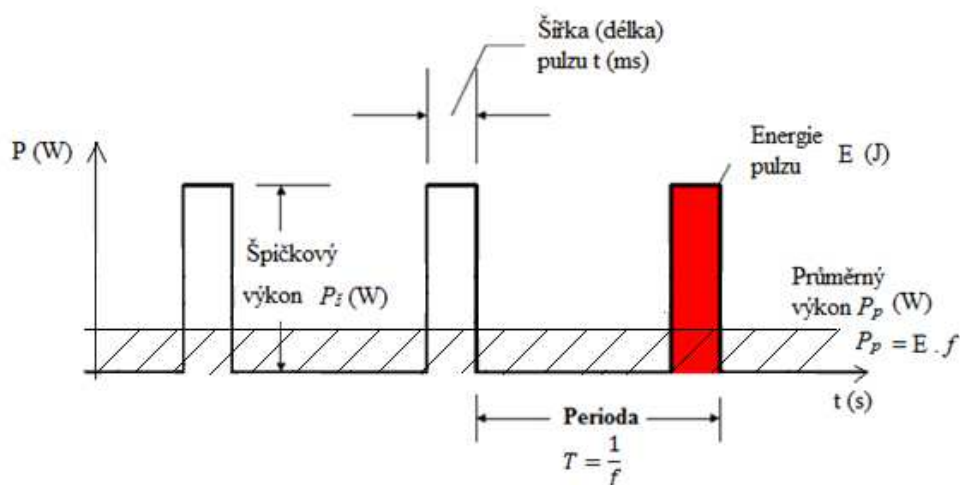
4.2.4. Směsné plyny

Při dělení materiálů, u kterých jsou kladeny speciální požadavky na řezání, se používá směsných plynů. Pro hliník a jeho slitiny, kde je potřeba vysoká řezná rychlost a zachování korozivzdornosti, se používá směs kyslíku a dusíku. Dělení reaktivních materiálů se pak provádí pomocí směsi argonu s heliem nebo argonu s oxidem uhličitým. [16]

4.3. Řezné parametry

K získání kvalitního řezu je potřeba správného nastavení řezných parametrů. Špatné nastavení těchto parametrů zvyšuje drsnost řezné hrany a je zvýšená tvorba otřepů. Dokonalého řezu se pak tedy dosáhne správným nastavením těchto parametrů:

- **Posuv (řezná rychlost)** [mm/min]- Název pro relativní rychlost mezi laserovou hlavou a řezaným materiálem. Se zvyšujícím posuvem je nutné zvyšovat i výkon laseru.
- **Tlak plynu** [bar]- Parametr, který má vliv na kvalitu řezu. Tlak plynu a jeho spotřeba je pak odvozena od průměru trysky.
- **Vzdálenost trysky** [mm]- Název pro vzdálenost trysky od řezaného materiálu, která má vliv na polohu ohniska a množství použitého plynu.
- **Poloha ohniska čočky** [mm]- Udává se vůči řezanému materiálu a ovlivňuje kvalitu řezu. Nastavuje se v závislosti na materiálu a druhu plynu.
- **Režim řezu** - Parametr ovlivňující množství vneseného tepla do materiálu. Laserové dělení materiálu se pak dělí na kontinuální a pulzní režim, u kterého je potřeba nastavit další parametry (f, E, t, P_p). Jsou-li výstupní pulzy laseru považovány za obdélníkové, lze výstup laseru znázornit pomocí diagramu.



Obr. 20 – Diagram výstupu laseru v pulzním režimu

Hlavní tři parametry, které ovlivňují pulzní režim jsou šířka pulzu t [ms], špičkový výkon P_{ξ} [W] a frekvence f [Hz].

$$f = \frac{1}{T} \quad [1]$$

kde T je perioda pulzů. Z diagramu vyplývá, že energie E [J] v každém pulzu je přímo úměrná ploše pulzu (vyznačená část) a je dána součinem špičkového výkonu P_{ξ} [W] a šířky pulzu t [ms].

$$E = P_{\xi} \cdot t \quad [2]$$

K určení průměrného výstupního výkonu P_p [W] laseru je potom nutné znát frekvenci f [Hz] a energii pulzu E [J].

$$P_p = f \cdot E \quad [3]$$

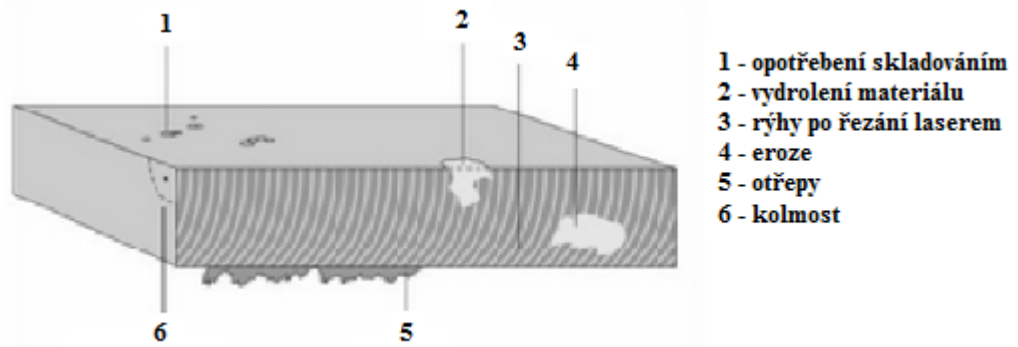
Špičkový (okamžitý) výkon P_{ξ} [W] je pak dán podílem energie pulzu E [J] ku šířce pulzu t [ms].

$$P_{\xi} = \frac{E}{t} \quad [4]$$

Ve výrobním procesu jsou špičkový výkon a energie pulzu hlavními faktory pro průnik laseru do materiálu. Průměrný výstupní výkon vzrůstá proporcionálně s kterýmkoliv ze tří hlavních parametrů pulzního režimu.

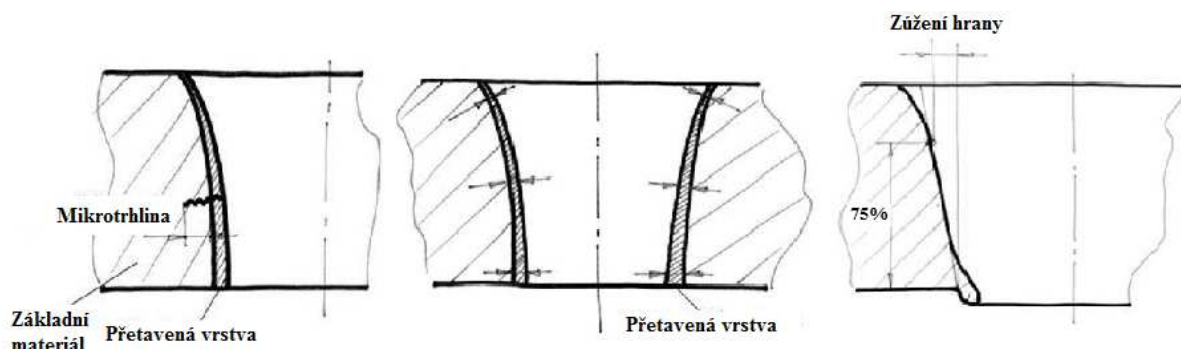
4.4. Vyhodnocení laserového řezání

Měřítkem pro vyhodnocení kvality laserového řezání jsou například velikosti otřepu, vydrolení materiálu nebo eroze, které lze posoudit pouhým okem. Pro přesnější vyhodnocení parametrů jako je tloušťka přetavené vrstvy nebo velikost mikrotrhliny je potřeba použití měřících mikroskopů. Přesné definice těchto parametrů lze získat z normy ČSN EN ISO 9013, která se právě týká klasifikace tepelných řezů.



Obr. 21 – Kritéria pro vyhodnocení laserového řezání [17]

- **Šířka řezu** - Je závislá především na průměru fokusovaného laserového svazku a vlnové délce záření a tloušťce řezaného materiálu.
- **Otřepy** - Nejdůležitější parametr při vyhodnocování kvality řezu. Otřepy lze rozdělit do dvou skupin na snadno odstranitelné a těžko odstranitelné. Jejich typ je velmi důležitý, protože každý otřep je nutné odstranit.
- **Mikrotrhlina do základního materiálu** - Velikost mikrotrhlin má vliv na následující využívání obrobku. Následné zatěžování rozšiřuje trhliny a může dospět až k nestabilnímu šíření trhliny - lomu.
- **Tloušťka přetavené vrstvy** - Tloušťka přetavené vrstvy má vliv na tvrdost povrchu materiálu. Dá se říci, že se vzrůstající tloušťkou přetavené vrstvy klesá její tvrdost a tedy i povrchu materiálu.
- **Zúžení hrany (Úkos)**- Vzdálenost, která udává rozšíření řezu. [17]



Obr. 22 – Mikrotrhlina, přetavená vrstva, zúžení hrany [17]

5. Praktická část

Cílem praktické části je seznámit se s laserovým systémem LASERDYNE 795 od společnosti Prima Power, který firma Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. používá k řezání materiálu. Následně pak z dat získaných od firmy vytvořit databázi řezných parametrů (názvy parametrů budou použity tak, jak je firma Honeywell používá a nemusí odpovídat fyzikálním veličinám) a tyto parametry optimalizovat tak, aby byla zvýšena produktivita a kvalita řezu.

5.1. Specifikace laseru

Laserový systém LASERDYNE 795 sestavený firmou Prima Power je 5-osý laserový systém využívaný v leteckém, kosmickém a automobilovém průmyslu. Tento systém obsahuje vláknový laser YLS-900/9000 od společnosti IPG. Kromě dělení materiálu lze laser použít i pro svařování a vrtání. Řezná hlava je vybavena zaostřovacím objektivem s cross-jet designem, který udržuje konstantní profil svazku LASERDYNE třetí generace "BeamDirector", tzv. BD3Y. Cross-jet funkce poskytuje vysokou přívodní rychlost ochranného plynu, který chrání objektiv před poškozením odlétajícími kovovými částicemi.

- Vlnová délka:	1 065 nm
- Lineární posuv (X,Y,Z):	100 x 100 x 100 cm
- Rotační posuv (C,D):	660°, -240°
- Rychlost lin. posuvu:	20 m/min
- Rychlost rot. posuvu:	90 otáček za minutu
- Max. špičkový výkon:	9 000 W
- Max. průměrný výkon:	900 W
- Max. frekvence:	500 Hz
- Max. energie pulzu:	45 J
- Šířka pulzu (min./max.):	0,2 ms až 5 ms
- Vzdálenost trysky:	1 mm až 10 mm
- Průměr trysky:	1 mm - 1,5 mm - 2,5 mm - 3,5 mm - 5 mm
- Tlak plynu:	1bar až 20 barů
- Ohnisková vzdálenost čoček:	125 mm - 200 mm- 250 mm



Obr. 23 – Laserový systém LASERDYNE 795 od firmy Prima Power [18]

5.2. Databáze laserových parametrů pro řezání materiálů

Po dokončení každého řezného procesu, uloží software systému řeznou návodku, kde je uvedeno, jaký materiál a o jaké tloušťce, popřípadě jaký dílec byl řezán. Dále je zde uvedeno, s jakými řeznými parametry byl řez proveden. Tyto návodky mi byly poskytnuty firmou Honeywell, abych sestavil databázi nejčastěji použitých materiálů a řezných parametrů pro jednotlivé tloušťky materiálu.

Materiál	<input type="text" value="CRES 347"/>	Přípravek	<input type="text" value="P/L5 3061104-902/10"/>
Tloušťka materiálu	<input type="text" value="0.81"/> [mm]		<input type="text"/>
Špičk. výkon	<input type="text" value="5000±5%"/>		
Frekvence	<input type="text" value="250"/> [Hz]	Chránění	<input type="text" value="Spirit w/BF 7200"/>
Šířka pulzu	<input type="text" value="0.3"/> [ms]	Číslo laser. hlavy	<input type="text" value="200mm 655957-003"/>
Interní výkon - Info Only	<input type="text" value="375±5%"/> [W]	Čočka	<input type="text" value="200"/> [mm]
Externí výkon	<input type="text" value="N/A"/> [W]	Číslo trysky	<input type="text" value="603271-0011"/>
Energie	<input type="text" value="1.5±5%"/> [J]	Průměr trysky	<input type="text" value="2.5 - 3.5"/> [mm]
Posuv	<input type="text" value="600"/> [mm/min]	álen. trysky	<input type="text" value="3±0.3"/> [mm]
Plyn	<input type="text" value="N"/>	Fokusační bod	<input type="text" value="-0.5±0.5"/> [mm]
Tlak plynu	<input type="text" value="9-11"/> [bar]		
		Autofokus	<input type="text" value="N/A"/>
		Buffer	<input type="text" value="NE"/>
		Korekce	<input type="text" value="Ne"/>
		Paleta	<input type="text" value="Paleta velká"/>

Obr. 24 – Řezná návodka

TLOUŠŤKA MATERIÁLU: 0,5 mm								
ČÍSLO ŘEZÁNÍ	MATERIÁL	ŠPIČK. VÝKON	FREKVENCE [Hz]	ŠÍŘKA PULZU [ms]	INTERNÍ VÝKON [W]	ENERGIE [J]	POSUV[mm/min]	PLYN
1.	CRES 347	6000	250	0,2	300	1,2	500	N ₂
2.	CRES 347	6000	250	0,2	300	1,2	500	N ₂
3.	CRES 347	6000	250	0,2	300	1,2	500	N ₂
4.	CRES 347	6000	250	0,2	300	1,2	700	N ₂
5.	CRES 347	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
6.	CRES 347	6000	250	0,2	300	1,2	500	N ₂
7.	CRES 347	5000	250	0,3	375	1,5	600+300	N ₂
8.	CRES 347	5000	250	0,3	375	1,5	600+300	N ₂
9.	CRES 321	5000	250	0,3	375	1,5	500	N ₂
10.	CRES 321	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
11.	CRES 321	3000	500	0,2	300	0,6	500	N ₂
12.	CRES 321	5000	250	0,3	375	1,5	500	N ₂
13.	CRES 321	6000	250	0,2	300	1,2	500	N ₂

Tabulka 6 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 0,5 mm

TLOUŠŤKA MATERIÁLU: 0,635 mm								
ČÍSLO ŘEZÁNÍ	MATERIÁL	ŠPIČK. VÝKON	FREKVENCE [Hz]	ŠÍŘKA PULZU [ms]	INTERNÍ VÝKON [W]	ENERGIE [J]	POSUV[mm/min]	PLYN
1.	INCO 347	6000	250	0,2	300	1,2	500	N ₂
2.	Ti-Cp	5000	250	0,3	375	1,5	600	Ar
3.	Ti-Cp	2000	500	0,2	200	0,4	700	Ar
4.	Ti-Cp	6000	250	0,2	300	1,2	600	Ar
5.	Ti-Cp	6000	250	0,2	300	1,2	600	Ar
6.	CRES 321	6000	250	0,2	300	1,2	500	N ₂
7.	CRES 321	6000	250	0,2	300	1,2	800	N ₂
8.	CRES 321	6000	250	0,2	300	1,2	700	N ₂
9.	CRES 321	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
10.	INCO 625	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
11.	INCO 718	6000	250	0,2	300	1,2	500	N ₂

Tabulka 7 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 0,635 mm

TLOUŠŤKA MATERIÁLU: 0,8 mm								
ČÍSLO ŘEZÁNÍ	MATERIÁL	ŠPIČK. VÝKON	FREKVENCE [Hz]	ŠÍŘKA PULZU [ms]	INTERNÍ VÝKON [W]	ENERGIE [J]	POSUV[mm/min]	PLYN
1.	CRES 321	7000	100	0,3	210	2,1	350	N ₂
2.	CRES 347	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
3.	CRES 347	6000	200	0,2	240	1,2	400	N ₂
4.	CRES 347	1000	500	0,2	100	0,2	500	N ₂
5.	HASTELLOY	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
6.	INCO 625	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
7.	Ti-Cp	6000	250	0,2	300	1,2	600	Ar
8.	HAST-X	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂

Tabulka 8 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 0,8 mm

TLOUŠŤKA MATERIÁLU: 0,81 mm								
ČÍSLO ŘEZÁNÍ	MATERIÁL	ŠPIČK. VÝKON	FREKVENCE [Hz]	ŠÍŘKA PULZU [ms]	INTERNÍ VÝKON [W]	ENERGIE [J]	POSUV[mm/min]	PLYN
1.	CRES 347	5000	250	0,3	375	1,5	500	N ₂
2.	CRES 347	5000	250	0,3	375	1,5	500	N ₂
3.	CRES 347	6000	250	0,2	300	1,2	500	N ₂
4.	CRES 347	5000	250	0,3	375	1,5	600	N ₂
5.	CRES 347	6000	400	0,3	720	1,8	500	N ₂
6.	INCO 625	5000	250	0,3	375	1,5	1800+600	N ₂
7.	INCO 625	3000	250	0,3	225	0,9	500	N ₂
8.	INCO 625	5000	250	0,3	375	1,5	800	N ₂
9.	INCO 617	6000	250	0,2	300	1,2	300	N ₂
10.	INCO 718	1000	500	0,2	100	0,2	500	N ₂
11.	INCO 347	6000	250	0,2	300	1,2	700	N ₂
12.	HS 230	5000	250	0,3	375	1,5	500	N ₂
13.	HAST-X	5000	250	0,2	250	1	900	N ₂

Tabulka 9 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 0,81 mm

TLOUŠŤKA MATERIÁLU: 1 mm								
ČÍSLO ŘEZÁNÍ	MATERIÁL	ŠPIČK. VÝKON	FREKVENCE [Hz]	ŠÍŘKA PULZU [ms]	INTERNÍ VÝKON [W]	ENERGIE [J]	POSUV[mm/min]	PLYN
1.	CRES	5000	250	0,3	375	1,5	500	N ₂
2.	CRES	5000	250	0,3	375	1,5	500	N ₂
3.	HASTELLOY	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
4.	HASTELLOY	7000	250	0,3	525	2,1	750	N ₂
5.	HASTELLOY	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
6.	HASTELLOY	6000	250	0,2	300	1,2	200	N ₂
7.	HS 230	7000	250	0,3	525	2,1	500	N ₂
8.	HS 230	7000	250	0,3	525	2,1	500	N ₂
9.	HS 230	7000	250	0,3	525	2,1	500	N ₂
10.	HS 230	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
11.	HS 230	7000	250	0,3	525	2,1	500	N ₂
12.	HAST-X	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
13.	HAST-X	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
14.	CRES 347	1000	500	0,2	100	0,2	500	N ₂
15.	INCO 718	1000	500	0,3	150	0,3	500	N ₂
16.	INCO 718	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
17.	INCO 718	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
18.	INCO 625	6000	250	0,2	300	1,2	500	N ₂
19.	Ti 6-4	5000	250	0,3	375	1,5	300	Ar
20.	Ti 6-4	5000	250	0,3	375	1,5	250	Ar
21.	Ti 6-4	5000	250	0,3	375	1,5	250	Ar

Tabulka 10 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 1 mm

TLOUŠŤKA MATERIÁLU: 1,27 mm								
ČÍSLO ŘEZÁNÍ	MATERIÁL	ŠPIČK. VÝKON	FREKVENCE [Hz]	ŠÍŘKA PULZU [ms]	INTERNÍ VÝKON [W]	ENERGIE [J]	POSUV[mm/min]	PLYN
1.	HAST-X	6000	250	0,3	450	1,8	450	N ₂
2.	HAST-S	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
3.	HS 188	5000	40	1,6	320	8	60	N ₂
4.	HS 188	5000	40	1,6	320	8	60	N ₂
5.	HS 188	3200	40	1	128	3,2	100	N ₂
6.	HS 188	3200	40	1	128	3,2	100	N ₂
7.	HS 230	7000	250	0,3	525	2,1	500	N ₂
8.	CRES 321	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
9.	INCO 625	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
10.	INCO 625	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
11.	INCO 625	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
12.	INCO 625	6000	250	0,2	300	1,2	600	N ₂
13.	INCO 625	5000	250	0,2	250	1	500	N ₂
14.	INCO 625	5000	250	0,3	375	1,5	500	N ₂

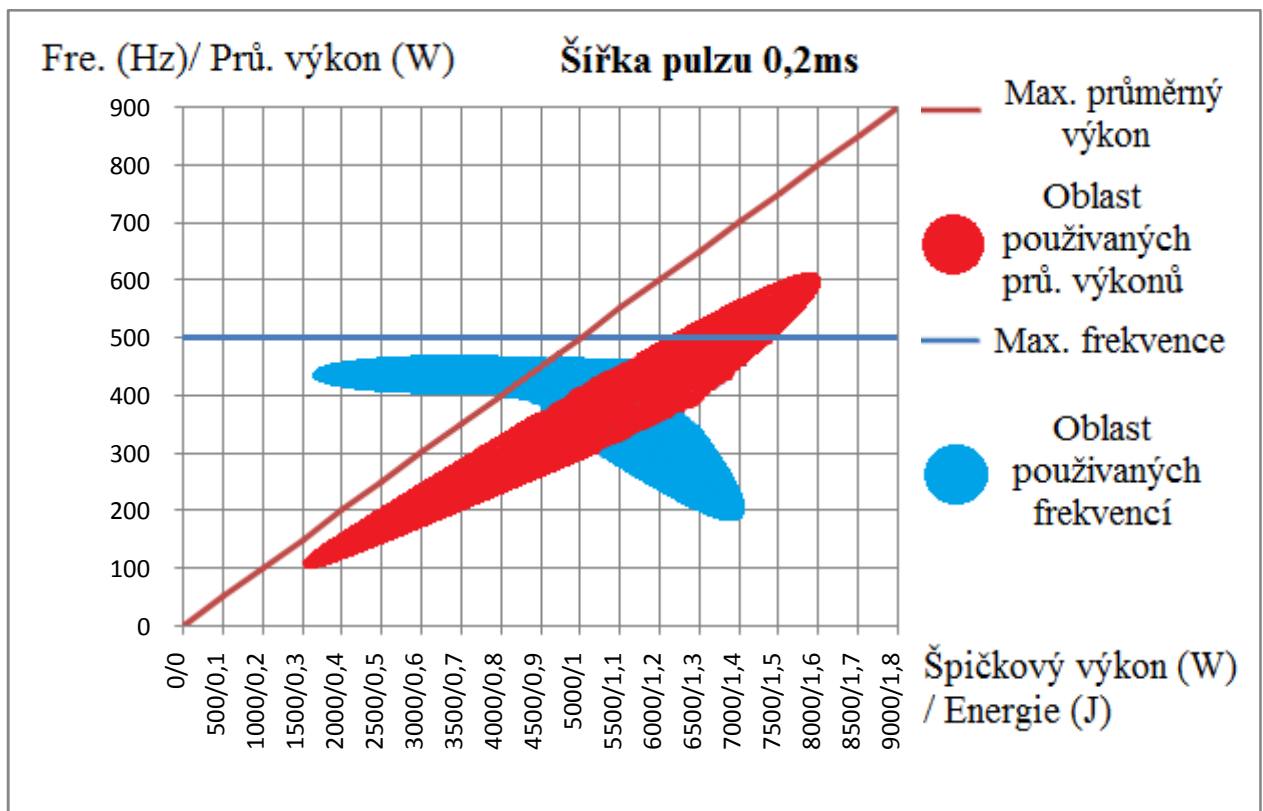
Tabulka 11 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 1,27 mm

5.3. Rozsah laseru

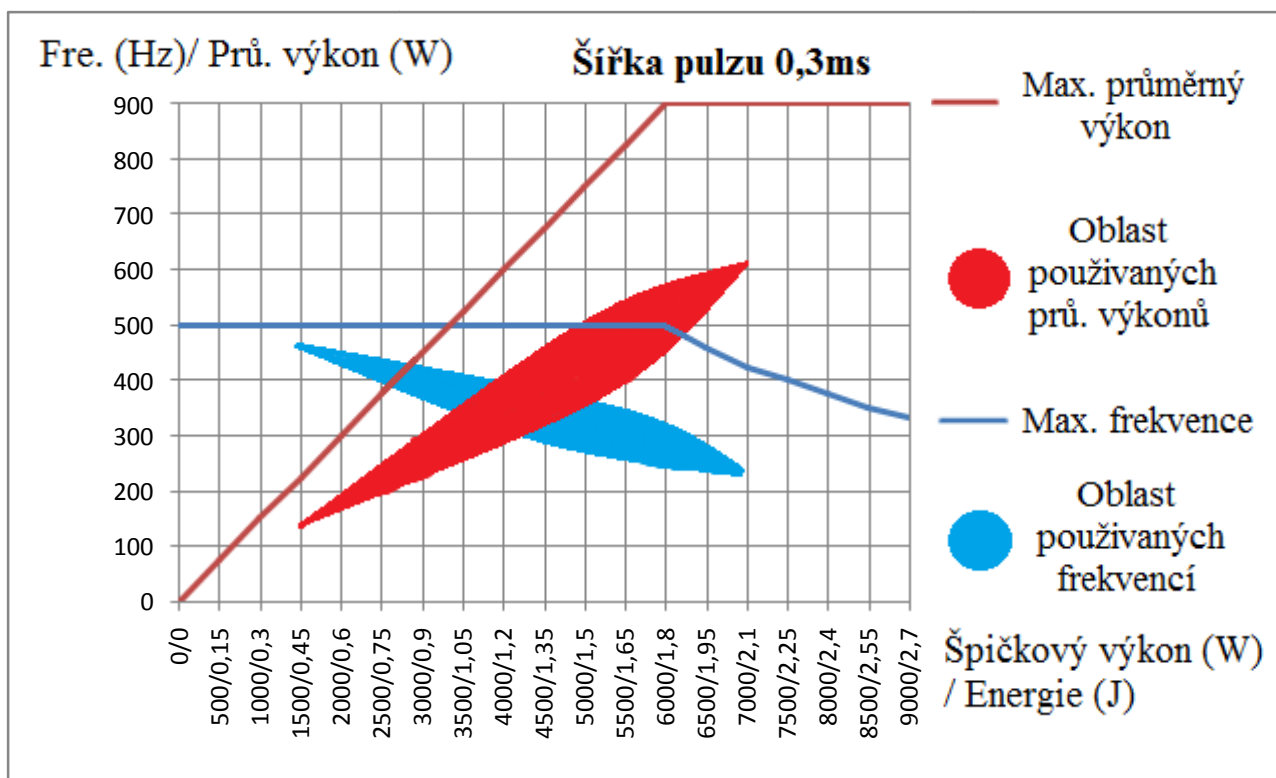
Pracovní rozsah laseru je závislý na nastavené šířce pulzu a špičkovém výkonu. Z těchto dvou hodnot lze pak pomocí vzorců 1 až 4 odvodit hodnoty pro energii, maximální průměrný výkon a maximální frekvenci. Podrobný rozsah laseru YLS-900/9000 je znázorněn v grafech pro šířku pulzu od 0,2 ms do 3 ms a špičkovém výkonu od 0 W do 9 000 W, které jsou v Příloze č. 1.

5.4. Současná oblast řezání

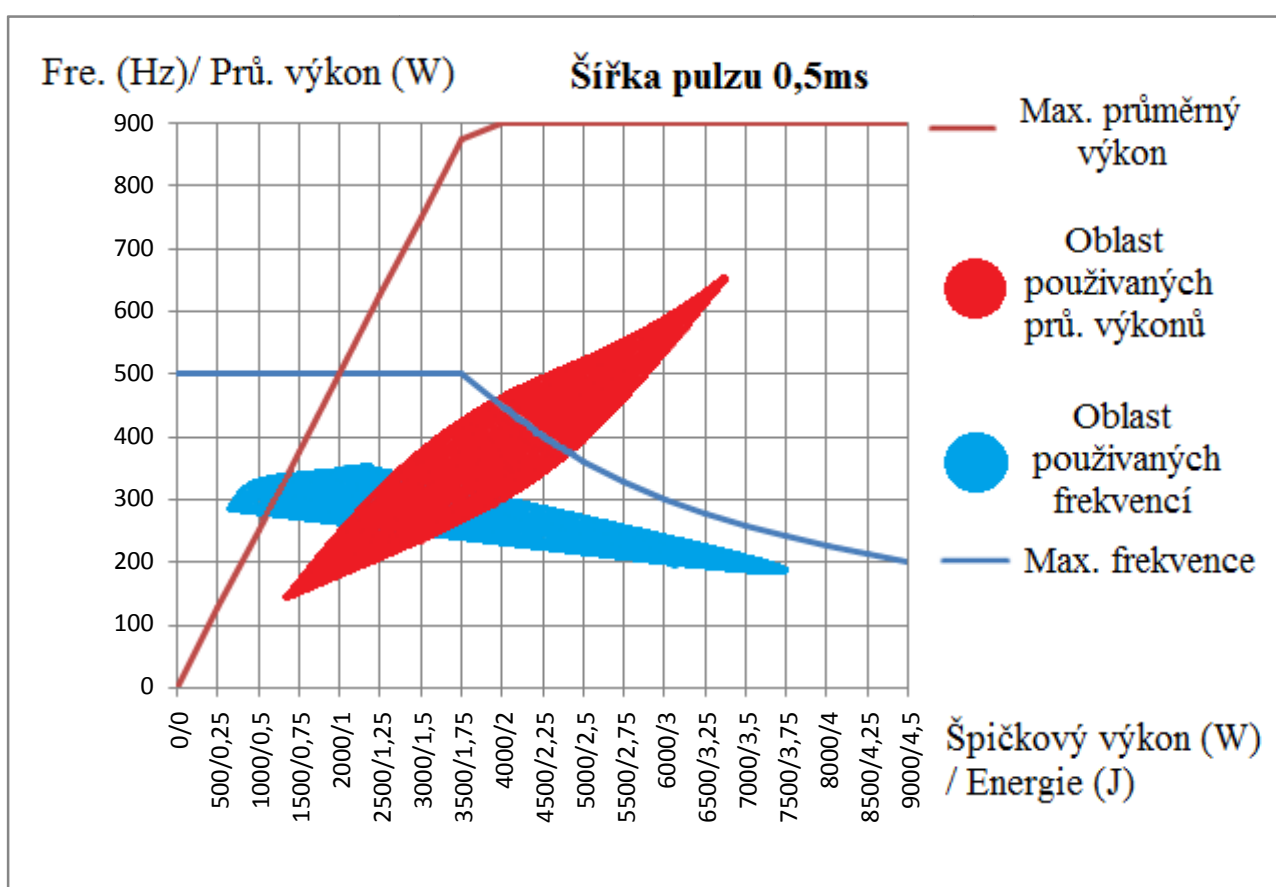
Řezné parametry získané z řezných návodek byly dosazeny do grafu rozsahu laseru. Po dosazení bylo zjištěno, že firma Honeywell při dělení materiálu nevyužívá maximální rozsah laseru viz. grafy pod tímto textem. Proto byla navržnuta série vzorků pro určení optimálních řezných parametrů k dosažení vysoké kvality řezu.



Graf 1 - Současná oblast řezných parametrů pro šířku pulzu 0,2 ms



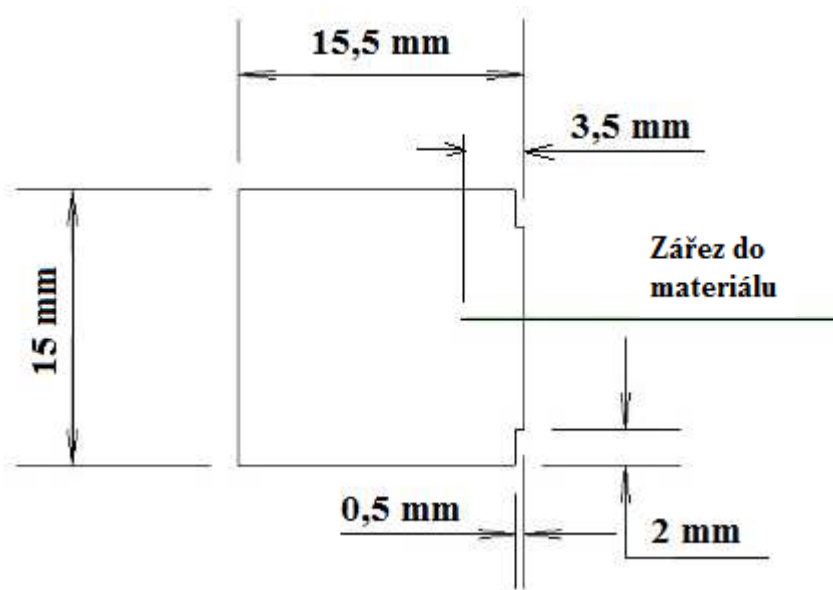
Graf 2 - Současná oblast řezných parametrů pro šířku pulzu 0,3 ms



Graf 3 - Současná oblast řezných parametrů pro šířku pulzu 0,5 ms

5.5. Návrh vzorku

Po domluvě s vedoucím práce byl zvolen tvar vzorku, u kterého by šla změřit velikost otřepů, šířka řezu, přetavená vrstva popřípadě rovinnost, vodorovnost, rovnoběžnost a pravoúhlost. Tento vzorek byl překreslen do CAD programu a následně převeden na CNC kód. Daný CNC kód je uveden v Příloze č. 2. Za vhodný materiál pro výrobu vzorků jsem zvolil nerezovou ocel CRESS 347, kterou firma Honeywell Aerospace využívá k výrobě leteckých dílů.



Obr. 25 – Návrh vzorku

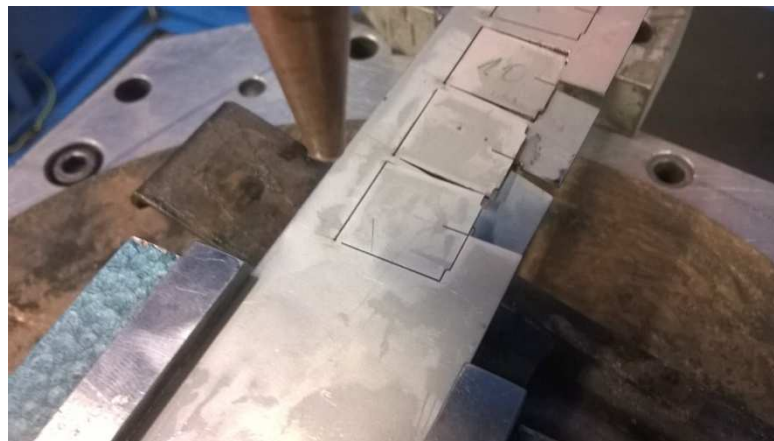
5.5.1. CRESS 347

CRESS 347 je slitina železa, chromu a niklu. Tato nerezová ocel je žíhaná a tažená za studena. Hlavní výhodou je vynikající odolnost proti mezikystalové korozi při vystavení teplotě nad 800° C. Typ 347 se obecně používá tam, kde jsou vysoké korozivní podmínky, jako jsou součásti leteckých motorů a turbín. Využití našel i u složitých svařovaných sestav, které nemohou být po svaření žíhány.

- Složení: Železo (68 %), Chrom (17 %), Nikl (11 %),
Mangan (max 2 %), Křemík (max 1 %)
- Hustota: 8 g/cm³
- Tvrdost (podle Brinella): 212 HB
- Bod tání: 1400 - 1425° C

5.6. Výroba a měření vzorků

- Výroba vzorku byla začata nanesením vrstvy oleje na spodní část očištěného pásku materiálu. Tato vrstva oleje zabraňuje usazování odlétajícím kovovým částicím na spodní straně materiálu. Pásek materiálu byl následně upnut do svěráku, který jsem umístil na podstavec uvnitř laserové kabiny. Po nastavení řezných parametrů byl spuštěn CNC kód a vyřezán vzorek. Každý vyřezaný vzorek byl zkontrolován a očíslován.



Obr. 26 – *Upnutý pásek materiálu s vyřezanými vzorky*

- Vzorky byly následně opatrně vyjmuty z pásku materiálu a zasunuty do sponky pro snadnější manipulaci a jednodušší umístění do mikroskopu za účelem měření přibližné velikosti otřepů.



Obr. 27 – *Upnutý a nevybroušený vzorek pro měření přibližné velikosti otřepů*

- Po změření velikosti otřepů byly vzorky i s držáky umístěny do nádob a zality dvousložkovou epoxidovou pryskyřicí Lecoset 7007. K zalitým vzorkům byly umístěny papírové štítky s katalogovým číslem pro jednodušší vyhledávání uskladněných vzorků. Následně byly tyto vzorky vloženy do přetlakové nádoby na dobu 15 minut pro odstranění bublin z pryskyřice. Po zaschnutí této pryskyřice byly vzorky vyklepány z nádob a zakrojena horní hrana.



Obr. 28 – *Pryskyřice Lecoset 7007 a vzorek zalitý v této pryskyřici*

- Takto zalité vzorky jsou umístěny do držáku a vybroušeny až na povrch vzorku. Celý proces broušení se skládá z několika kroků během kterých se mění drsnost brusného papíru. Po dokončení brusného procesu jsou vzorky očištěny lihem a řádně osušeny. Dokonale osušené vzorky jsou poté vyleptány kyselinou šťavelovou pro zvýraznění struktury vzorků.



Obr. 29 – *Bruska na vzorky a leptací lázeň*

- U vyleptaných vzorků byla následně změřena na tloušťka přetavené vrstvy a velikost mikrotrhlin. Tyto parametry byly měřeny laboratoří firmy Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. podle normy EMS 52571, která se zabývá vyhodnocením kvality řezu. Samotné měření přetavené vrstvy spočívá ve změření 6 až 8 hodnot z celkové délky řezu a jejich zprůměrování. Náklady na vytvoření a vyhodnocení jednoho vzorku jsou cca 500 Kč.



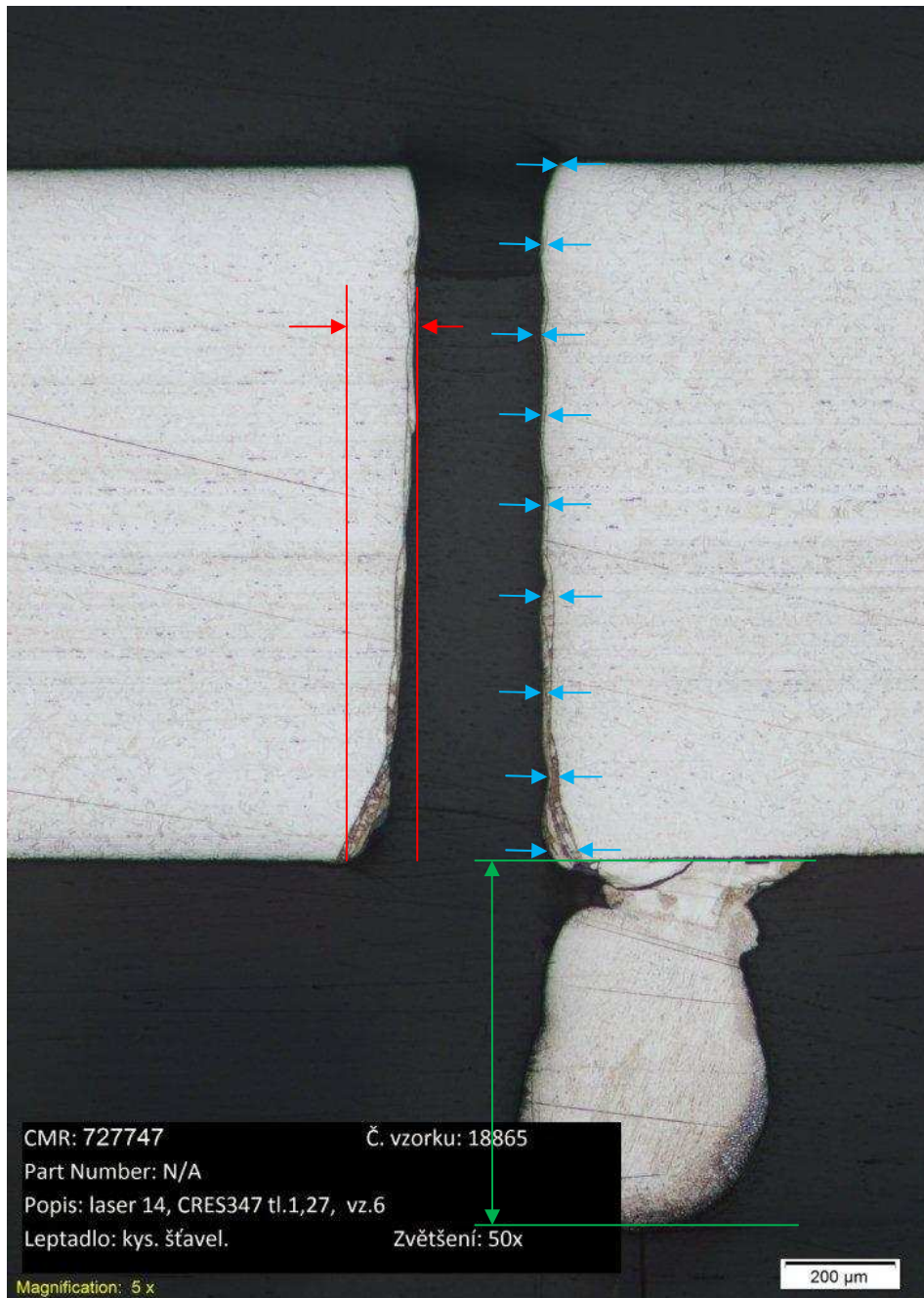
Obr. 30 – Vybroušený a vyleptaný vzorek připravený k měření



Obr. 31 – Sestava pro vyhodnocení kvality řezu

5.7. Vyhodnocení vzorků

Vzorky jsem vyhodnotil pro tři základní kritéria ovlivňující kvalitu řezu, a to přetavenou vrstvu, mikrotrhliny a úkos. Za parametry ovlivňující tyto kritéria jsem vybral špičkový výkon, frekvenci, šířku pulzu a řeznou rychlost (posuv). Ostatní parametry pak byly po celou dobu konstantní. Dle normy je povolena přetavená vrstva do maximální tloušťky 0,09 mm, mikrotrhliny do velikosti 0,025 mm a maximální úkos stěny do 0,08 mm.



Obr. 32 – Vyhodnocované parametry řezu a velikost otřepu

Vstupní data								Výstupní data							
Číslo vzorku	Tloušťka materiálu [mm]	Špičkový výkon [W]	Frekvence [Hz]	Šířka pulzu [ms]	Prům. výkon [W]	Energie [J]	Posuv [mm/min]	Velikost otřepů [mm]	Typ otřepů [T/M]	Průměrná tloušťka přetavené vrstvy [mm]			Mikro-trhliny [mm]	Úkos [μm]	
										Levá strana	Pravá strana	Celková		L.S.	P.S.
1.	0,5	6000	250	0,2	300	1,2	500	0,125	M	0,010	0,007	0,009	0	22	17
2.	0,5	4000	250	0,3	300	1,2	500	0,134	M	0,010	0,008	0,009	0	31	19
3.	0,5	2400	250	0,5	300	1,2	500	0,123	M	0,010	0,007	0,009	0	7	12
4.	0,5	1200	250	1	300	1,2	500	0,114	M	0,009	0,006	0,008	0	39	22
5.	0,5	750	250	1,6	300	1,2	500	0,119	M	0,008	0,007	0,008	0	25	8
6.	0,5	600	250	2	300	1,2	500	0,109	M	0,006	0,007	0,007	0	5	13
7.	0,5	400	250	3	300	1,2	500	0,103	M	0,006	0,006	0,006	0	6	25
8.	0,5	9000	250	0,3	675	1,7	500	0,129	M	0,012	0,009	0,011	0	8	33
9.	0,5	8000	250	0,3	600	2,4	500	0,134	M	0,014	0,008	0,011	0	54	17
10.	0,5	7000	250	0,3	525	2,1	500	0,176	M	0,015	0,011	0,013	0	6	12
11.	0,5	6000	250	0,3	450	1,8	500	0,138	M	0,011	0,008	0,010	0	23	9
12.	0,5	5000	250	0,3	375	1,5	500	0,149	M	0,011	0,008	0,010	0	20	11
13.	0,5	4000	250	0,3	300	1,2	500	0,122	M	0,009	0,007	0,008	0	25	15
14.	0,5	3000	250	0,3	225	0,9	500	0,108	M	0,009	0,005	0,007	0	9	30
15.	0,5	2000	250	0,3	150	0,6	500	0,115	M	0,008	0,007	0,008	0	15	10
16.	0,5	1000	250	0,3	75	0,3	500	0,127	M	0,009	0,008	0,009	0	24	22
17.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	100	0,104	M	0,013	0,009	0,011	0	9	17
18.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	200	0,138	M	0,011	0,010	0,011	0	17	48
19.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	300	0,163	M	0,013	0,009	0,011	0	46	35
20.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	400	0,199	M	0,011	0,010	0,011	0	14	9

Tabulka 12 - Řezné parametry a vyhodnocení kvality řezu pro vzorky 1-20

Vstupní data								Výstupní data							
Číslo vzorku	Tloušťka materiálu [mm]	Špičkový výkon [W]	Frekvence [Hz]	Šířka pulzu [ms]	Prům. výkon [W]	Energie [J]	Posuv [mm/min]	Velikost otřepů [mm]	Typ otřepů [T/M]	Průměrná tloušťka přetavené vrstvy [mm]			Mikro-trhliny [mm]	Úkos [μm]	
										Levá strana	Pravá strana	Celková		L.S.	P.S.
21.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	500	0,221	M	0,011	0,008	0,010	0	7	8
22.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	600	0,257	M	0,014	0,007	0,011	0	12	48
23.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	700	0,264	M	0,010	0,008	0,009	0	37	17
24.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	800	0,291	M	0,013	0,007	0,010	0	33	28
25.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	900	0,287	M	0,011	0,007	0,009	0	19	12
26.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	1 000	0,275	M	0,012	0,007	0,010	0	8	38
27.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	1 100	0,297	M	0,012	0,009	0,011	0	29	8
28.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	1 200	0,305	M	0,015	0,008	0,012	0	21	21
29.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	1 300	0,348	M	0,016	0,011	0,014	0	17	28
30.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	1 400	0,312	M	0,014	0,010	0,012	0	30	6
31.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	1 500	0,299	M	0,014	0,010	0,012	0	30	8
32.	0,5	6000	500	0,2	600	1,2	1 600	0,397	M	0,022	0,017	0,020	0	28	55
33.	1,27	5000	250	0,2	300	1	500	0,254	M	0,014	0,013	0,014	0	26	13
34.	1,27	5000	375	0,2	400	1	500	0,352	M	0,016	0,011	0,014	0	13	13
35.	1,27	5000	500	0,2	500	1	500	0,423	M	0,017	0,017	0,017	0	34	51
36.	1,27	5000	250	0,3	300	1,5	500	0,317	M	0,013	0,013	0,013	0	30	15
37.	1,27	5000	375	0,3	525	1,5	500	0,705	M	0,014	0,010	0,012	0	65	21
38.	1,27	5000	500	0,3	750	1,5	500	0,976	M	0,017	0,015	0,016	0	91	32
39.	1,27	5000	125	0,3	75	1,5	500	0,282	M	0,031	0,026	0,029	0	15	28
40.	1,27	5000	125	0,2	200	1	500	0,384	M	0,056	0,049	0,053	0	22	84

Tabulka 13 - Řezné parametry a vyhodnocení kvality řezu pro vzorky 21-40

Vstupní data								Výstupní data							
Číslo vzorku	Tloušťka materiálu [mm]	Špičkový výkon [W]	Frekvence [Hz]	Šířka pulzu [ms]	Prům. výkon [W]	Energie [J]	Posuv [mm/min]	Velikost otřepů [mm]	Typ otřepů [T/M]	Průměrná tloušťka přetavené vrstvy [mm]			Mikro-trhliny [mm]	Úkos [μm]	
										Levá strana	Pravá strana	Celková		L.S.	P.S.
41.	1,27	5000	500	0,2	500	1	1 000	0,437	M	0,017	0,014	0,016	0	12	9
42.	1,27	5000	500	0,3	750	1,5	1 000	0,635	M	0,017	0,010	0,014	0	20	11
43.	1,27	5000	200	0,5	500	2,5	500	0,747	M	0,010	0,011	0,011	0	43	28
44.	1,27	5000	350	0,5	875	2,5	500	1,085	M	0,012	0,013	0,013	0	59	52
45.	1,27	5000	350	0,5	875	2,5	1 000	0,894	M	0,014	0,013	0,014	0	38	23
46.	1,27	6000	250	0,2	300	1,2	400	0,288	M	0,022	0,021	0,022	0	15	9
47.	1,27	6000	250	0,2	300	1,2	600	0,352	M	0,027	0,025	0,026	0	22	12
48.	1,27	6000	500	0,2	600	1,2	900	0,288	M	0,019	0,021	0,020	0	31	17
49.	1,27	6000	500	0,2	600	1,2	1 100	0,230	M	0,025	0,016	0,021	0	19	13
50.	1,27	6000	500	0,2	600	1,2	1 200	0,288	M	0,032	0,032	0,032	0	60	30
51.	1,27	6000	250	0,3	450	1,8	400	0,352	M	0,018	0,014	0,016	0	18	15
52.	1,27	6000	250	0,3	450	1,8	600	0,529	M	0,019	0,020	0,019	0	20	11
53.	1,27	6000	500	0,3	900	1,8	800	0,437	M	0,012	0,011	0,012	0	43	20
54.	1,27	6000	500	0,3	900	1,8	1 000	0,976	M	0,013	0,012	0,013	0	24	10
55.	1,27	6000	500	0,3	900	1,8	1 200	0,288	M	0,014	0,010	0,012	0	33	14
56.	1,27	6000	250	0,5	750	3	400	0,127	M	0,014	0,010	0,012	0	10	7
57.	1,27	6000	250	0,5	750	3	600	0,352	M	0,013	0,015	0,016	0	12	11
58.	1,27	6000	300	0,5	900	3	500	0,384	M	0,13	0,013	0,013	0	7	8
59.	1,27	6000	300	0,5	900	3	800	0,254	M	0,016	0,015	0,016	0	10	8
60.	1,27	6000	300	0,5	900	3	1 000	0,701	M	0,024	0,020	0,022	0	23	15

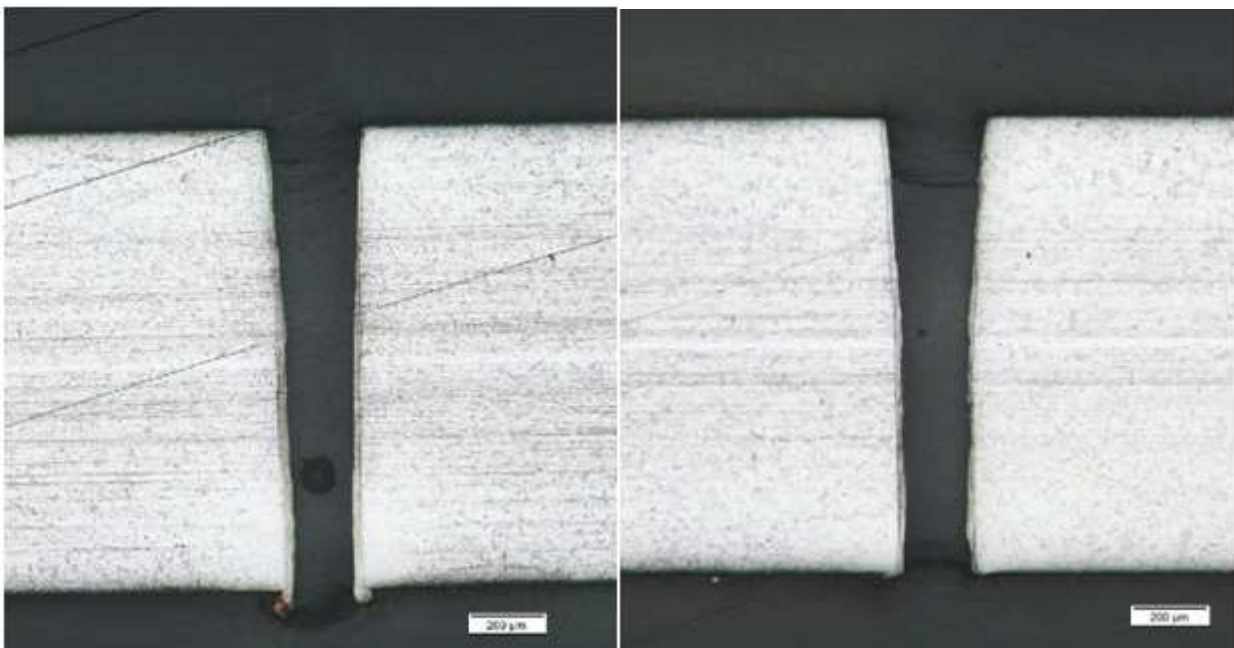
Tabulka 14 - Řezné parametry a vyhodnocení kvality řezu pro vzorky 41-60

5.8. Zhodnocení výsledků experimentu

Výsledky optimalizace parametrů laserového řezání byly srovnávány především s parametry které firma Honeywell v současné době používá. Po stránce kvality řezu byly posuzovány parametry jako velikost a typ otřepů, velikost přetavené vrstvy, úkos a mikrothliny do základního materiálu.

Z výsledků vyplývá že nejlepších hodnot bylo dosaženo řezáním s nízkou frekvencí a pomalou řeznou rychlostí. Takovéto řezání by však bylo pro firmu Honeywell po stránce finanční neefektivní a proto byla sestavena série pokusů, která by našla optimální kompromis mezi kvalitou řezu a dobou potřebou k výrobě dílce.

Vyhodnocením prvních třiceti vzorků bylo zjištěno, že velikost tloušťky přetavené vrstvy klesá s rostoucí šířkou pulzu. Dále tloušťka přetavené vrstvy klesá se snižující se energií pulzu. U řezné rychlosti bylo zjištěno, že optimální rychlost je v rozsahu od 400 mm/min do 1200 mm/min. Tyto rychlosti zajišťují kvalitní řez a malou tloušťku přetavené vrstvy. Vyšší rychlosti lze použít pro rovný řez, ale ne už pro vyřezávání složitějších struktur. Z posledních vzorků bylo zjištěno, že optimální řezná rychlost by měla být až dvojnásobně větší než použitá frekvence.



Obr. 33 – *Levá strana: řezání se současnými parametry řezu
šířka pulzu 0,3 mS, energie pulzu 1,8 J, frekvence 250 Hz, posuv 400 mm/min
pravá strana: řezání s optimalizovanými parametry řezu
šířka pulzu 0,3 mS, energie pulzu 1,8 J, frekvence 500 Hz, posuv 800 mm/min*

6. Závěr

Diplomová práce byla vypracována ve spolupráci s firmou Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. se sídlem v Hlubočkách - Mariánském Údolí. Jejím hlavními cíli bylo vytvoření databáze řezných parametrů pro jednotlivé tloušťky plechu, zmapování pracovního rozsahu laserového systému LASERDYNE 795, který firma využívá k řezání materiálu a optimalizace parametrů, které ovlivňují kvalitu řezu.

V teoretické části je popsána historie laseru, jeho princip, konstrukce a vlastnosti laserového záření. Dále se zde věnuji rozdělení laserů, ať už podle aktivního prostředí na pevnolátkové, kapalinové, plynové, polovodičové a vláknové nebo podle vlnové délky či třídy bezpečnosti.

Ve druhé polovině teoretické části se zabývám využitím laseru ve strojírenství jako je gravírování, leštění, kalení, povlakování, navařování, svařování, vrtání a řezání. Laserovému řezání je věnována samostatná kapitola, ve které jsou popsány metody laserového řezání, plyny využívané při laserovém řezání, řezné parametry a vyhodnocení laserového řezání.

V praktické části je popsán laserový systém LASERDYNE 795 a jeho parametry. Dále je zde z dat získaných z řezných návodek sestavena databáze řezných parametrů pro jednotlivé tloušťky plechu, která je uvedena na str. 36 až 39. Maximální pracovní rozsah laseru pro jednotlivé šířky pulzu je znázorněn pomocí grafů přiložených v Příloze č.1 a zmapována oblast současného řezání.

Na závěr je uveden postup výroby, měření a vyhodnocení vzorků. Tyto výsledky z vyhodnocení vzorků jsou zaznamenány v tabulkách řezných parametrů a kvality řezu na straně 57 až 60.

Hlavním výsledkem diplomové práce je tedy že firma Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. plně nevyužívá pracovní rozsah laseru a dá říct, že kdyby firma Honeywell lépe využila maximálního pracovního rozsahu laseru a optimální řeznou rychlost, zkrátila by čas na výrobu dílce až dvojnásobně. Tento závěr však platí jen pro

vyráběné dílce, kde se dá plně využít zvýšené rychlosti řezu. To je především u skupin dílců s nižším požadavkem na přesnost a tvarovou náročnost.

Seznam použité literatury

- [1] BENKO, Bernard. *Laserové technologie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej Technickej Univerzity, 2000. 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
- [2] VRBOVÁ, Miroslava. *Lasery a moderní optika*. Praha: Prometheus, 1994. 474 s. ISBN 80-85849-56-9.
- [3] Vlnová délka *Wikipedie.cz* . 2014.[on-line]. Dostupné z Internetu:
< http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlnová_délka>.
- [4] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. Plzeň: Západočeská Univerzita, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
- [5] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu a praxi*. Praha: Europa Sobotáles, 2007. 612s. ISBN 987-80-86706-19-1
- [6] Hlavní typy laseru *mega-blog.cz* . 2014.[on-line]. Dostupné z Internetu:
< <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>>.
- [7] Úvod do světa laserů *lasery.wz.cz* . 2014. [on-line]. Dostupné z Internetu:
<<http://lasery.wz.cz/uvod.html>>.
- [8] Svět objevů *cez.cz* . 2014.[on-line]. Dostupné z Internetu:
< <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm> >.
- [9] Nejmenší polovodičový laser na světě *aldebaran.cz* 2015.[on-line]. Dostupné z Internetu: < http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_45_las.php>.
- [10] SIEGMAN, A. E. *Lasers*. University Science Books. 1986 s. 664–669. ISBN 0-935702-11-3.
- [11] Polovodičový laser *microdesignum.cz* 2015.[on-line]. Dostupné z Internetu:
< <http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>>.
- [12] Laser *Wikipedie.cz* . 2015.[on-line]. Dostupné z Internetu:
< <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>>.
- [13] Laserové systémy *arc-robotics.cz*. 2014.[on-line]. Dostupné z Internetu:
< <http://www.arc-robotics.cz/laserove-systemy.html>>.
- [14] Laserová technika *trumpf.com*. 2015.[on-line]. Dostupné z Internetu:
< <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika.html>>.
- [15] Laserové řezání *engineering.columbia.edu*. 2015.[on-line]. Dostupné z Internetu:
<<http://www.aml.engineering.columbia.edu/ntm/level1/ch03/html/11c03s05.html>>.
- [16] Plyny v průmyslu *linde-gas.cz*. 2015.[on-line]. Dostupné z Internetu:
<<http://www.linde-gas.cz/cs/industries/index.html>>.

[17] KOČMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Praha: Akademické nakladatelství CERM, 2011. 332 s. ISBN 97-880-72047-22-2

[18] Laserdyne 795 *primapower.com*. 2015.[on-line]. Dostupné z Internetu: <<http://www.primapower.com/en/products/thelaser/laserdyne-795-en/>>.

Seznam použitých zkratek a symbolů

%	procento
ν	frekvence fotonu
h	Planckova konstanta
E_1, E_2	energetická hladina
cm	centimetr
mm	milimetr
μm	mikrometr
nm	nanometr
W	watt
ms	milisekunda
Hz	hertz
J	joule
°	stupeň
m/min	metrů za minutu
mm/min	milimetrů za minutu
N	dusík
Ar	argon
O	kyslík
g/cc	gram na kubický centimetr
lb/in ³	libra na palec krychlový
°C	stupně celsia
T/M	tvrdé/měkké
L.S.	levá strana
P.S.	pravá strana

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Rozdělení laseru.....	16
Tabulka 2 - Pevnolátkové lasery.....	17
Tabulka 3 - Kapalinové lasery.....	18
Tabulka 4 - Plynové lasery.....	18
Tabulka 5 - Polovodičové lasery.....	19
Tabulka 6 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 0,5 mm....	36

Tabulka 7 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 0,635mm.	36
Tabulka 8 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 0,8 mm.	37
Tabulka 9 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 0,81 mm.	37
Tabulka 10 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 1 mm.	38
Tabulka 11 - Databáze laserových parametrů pro řezání materiálu o tloušťce 1,27mm.	39
Tabulka 12 - Řezné parametry a vyhodnocení kvality řezu pro vzorky 1-20.	47
Tabulka 13 - Řezné parametry a vyhodnocení kvality řezu pro vzorky 21-40.	48
Tabulka 14 - Řezné parametry a vyhodnocení kvality řezu pro vzorky 41-60.	49

Seznam obrázků

Obr. 1 – Vynálezce laseru Theodore Maiman	10
Obr. 2 – Tříhladinový He-Ne laser.	11
Obr. 3 - Konstrukce laseru	12
Obr. 4 - Zesilování laserového paprsku	13
Obr. 5 - Vlnová délka	15
Obr. 6 - Módová struktura	15
Obr. 7 - Závislost absorpce na vlnové délce	15
Obr. 8 - Konstrukce Nd:YAG laseru	17
Obr. 9 - Konstrukce CO ₂ laseru	19
Obr. 10 - Konstrukce GaN laseru	20
Obr. 11 - Konstrukce vláknového laseru	20
Obr. 12 – Princip laserového navařování	24
Obr. 13 – Metody laserového svařování	25
Obr. 14 – Princip laserového vrtání	26
Obr. 15 – Metoda vrtání jednotlivými impulzy	26
Obr. 16 – Metoda nárazového vrtání	27
Obr. 17 – Metoda trepanačního vrtání	27
Obr. 18 – Metoda spirálového vrtání	27
Obr. 19 – Princip laserového řezání	28
Obr. 20 – Diagram výstupu laseru v pulzním režimu	31

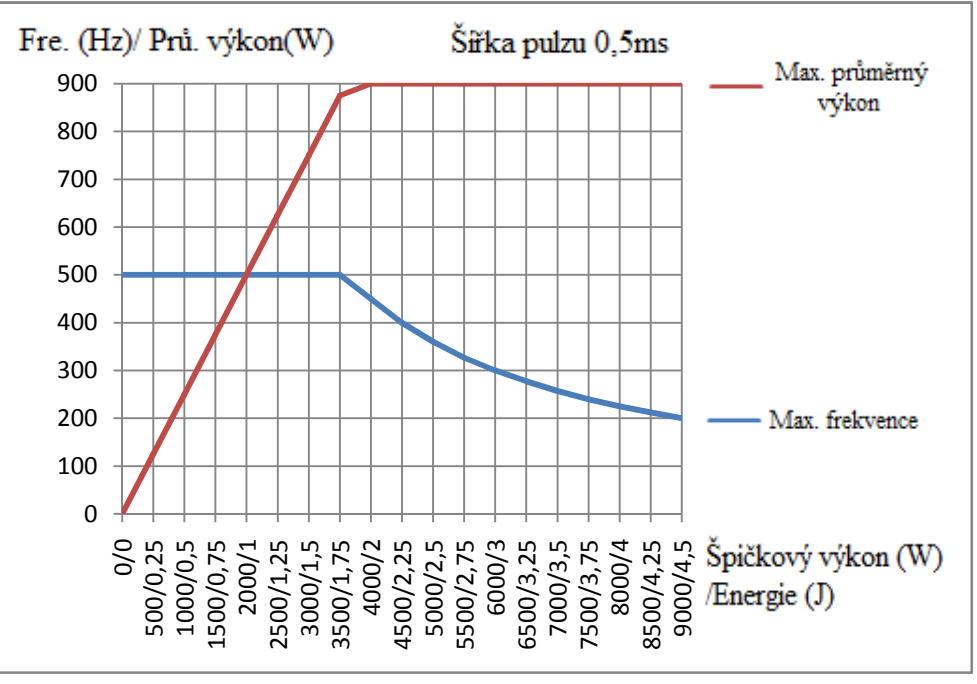
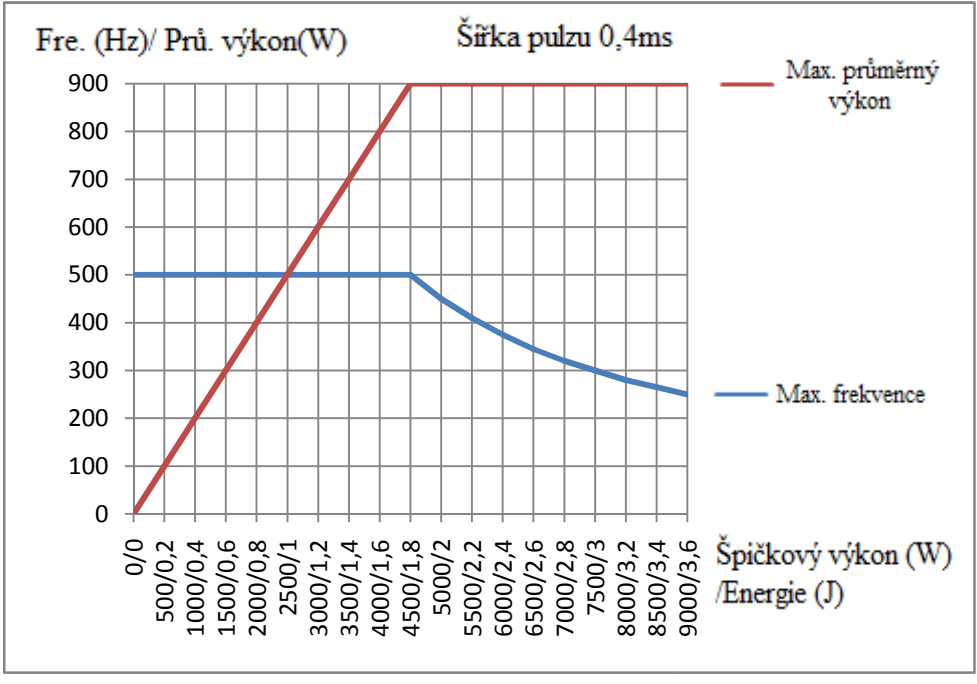
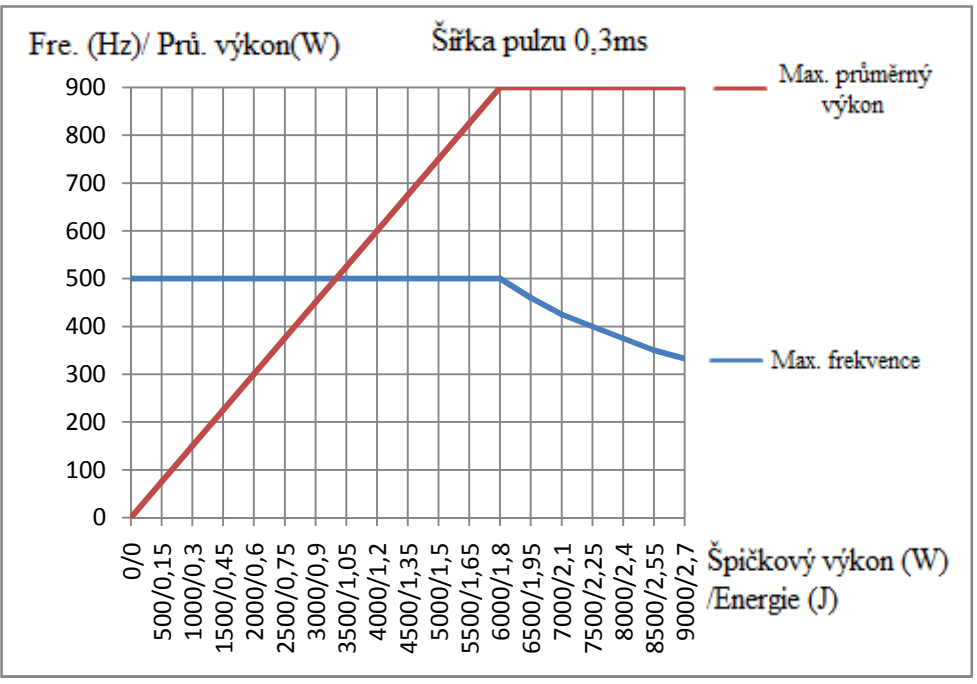
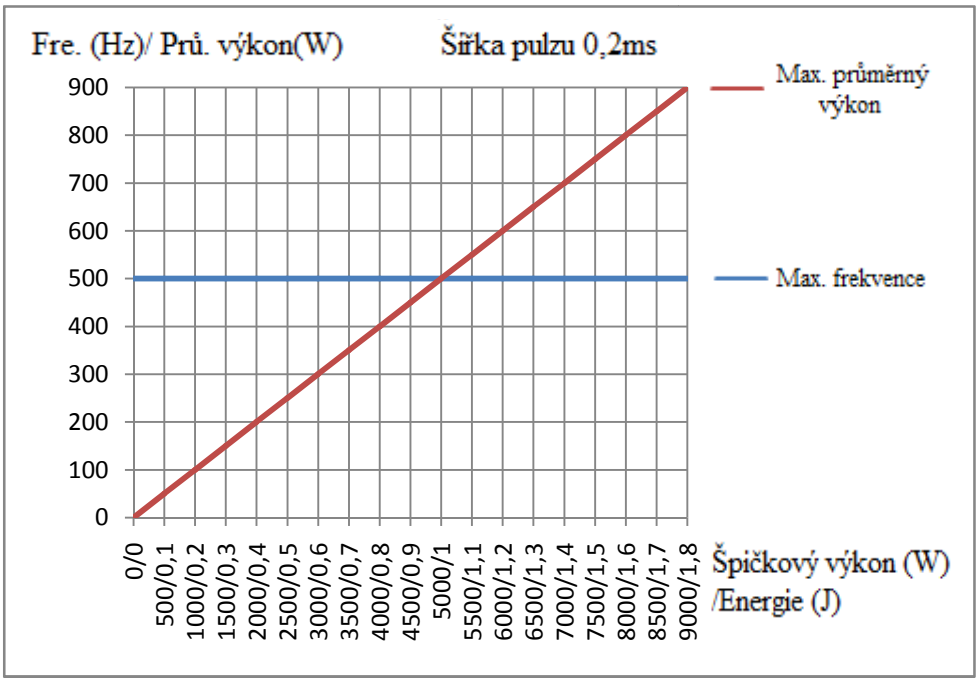
Obr. 21 – <i>Kritéria pro vyhodnocené laserového řezání</i>	33
Obr. 22 – <i>Mikrotrhlina, přetavená vrstva, zúžení hrany</i>	33
Obr. 23 – <i>Laserový systém LASERDYNE 795 od firmy Prima Power</i>	35
Obr. 24 – <i>Řezná návodka</i>	35
Obr. 25 – <i>Návrh vzorku</i>	42
Obr. 26 – <i>Upnutý pásek materiálu s vyřezanými vzorky</i>	43
Obr. 27 – <i>Upnutý a nevybroušený vzorek pro měření přibližné velikosti otřepů</i>	43
Obr. 28 – <i>Pryskyřice Lecoset 7007 a vzorek zalití v této pryskyřici</i>	44
Obr. 29 – <i>Bruska na vzorky a leptací lázeň</i>	44
Obr. 30 – <i>Vybroušený a vyleptaný vzorek připravený k měření</i>	45
Obr. 31 – <i>Sestava pro vyhodnocení kvality řezu</i>	45
Obr. 32 – <i>Vyhodnocované parametry řezu a velikost otřepu</i>	46
Obr. 33 – <i>Levá strana: řezání se současnými parametry řezu šířka pulzu 0,3 ms, frekvence 250 Hz posuv 400 mm/min pravá strana: řezání s optimalizovanými parametry řezu šířka pulzu 0,3 ms, frekvence 500 Hz posuv 800 mm/min</i>	50

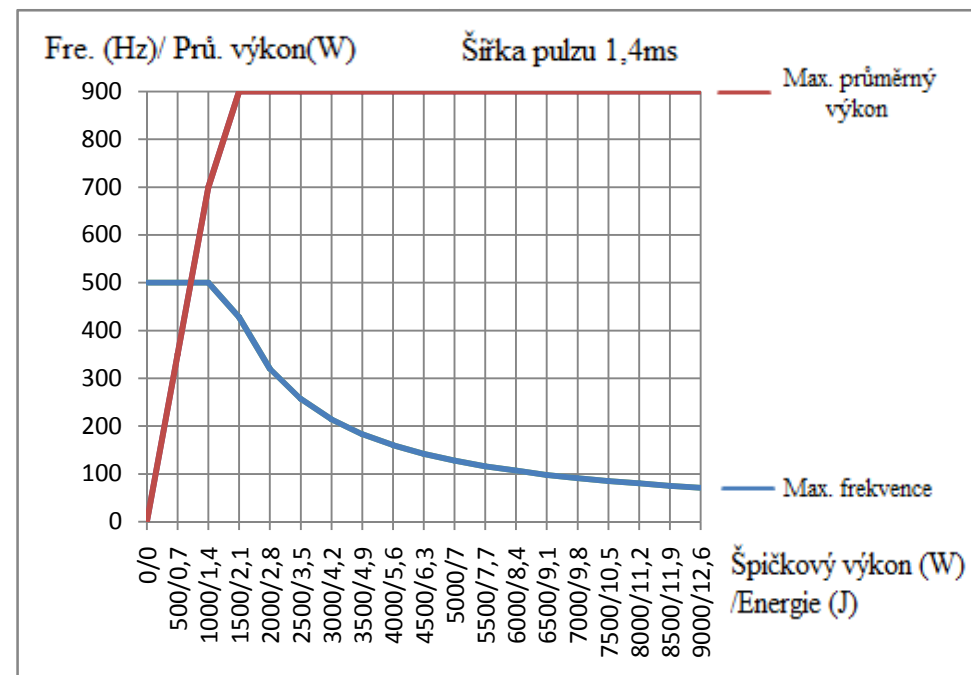
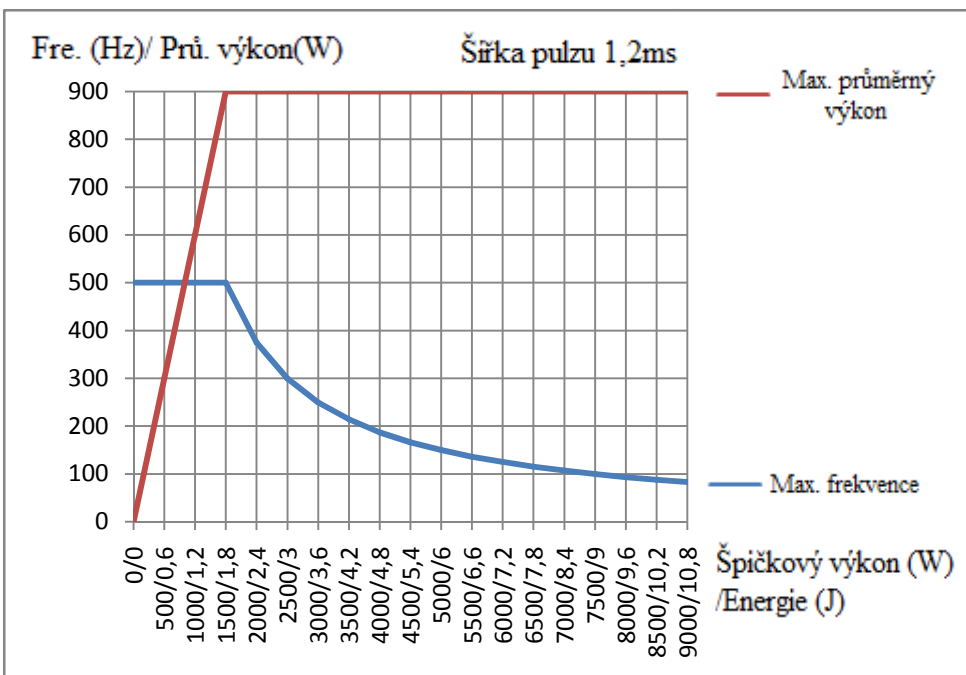
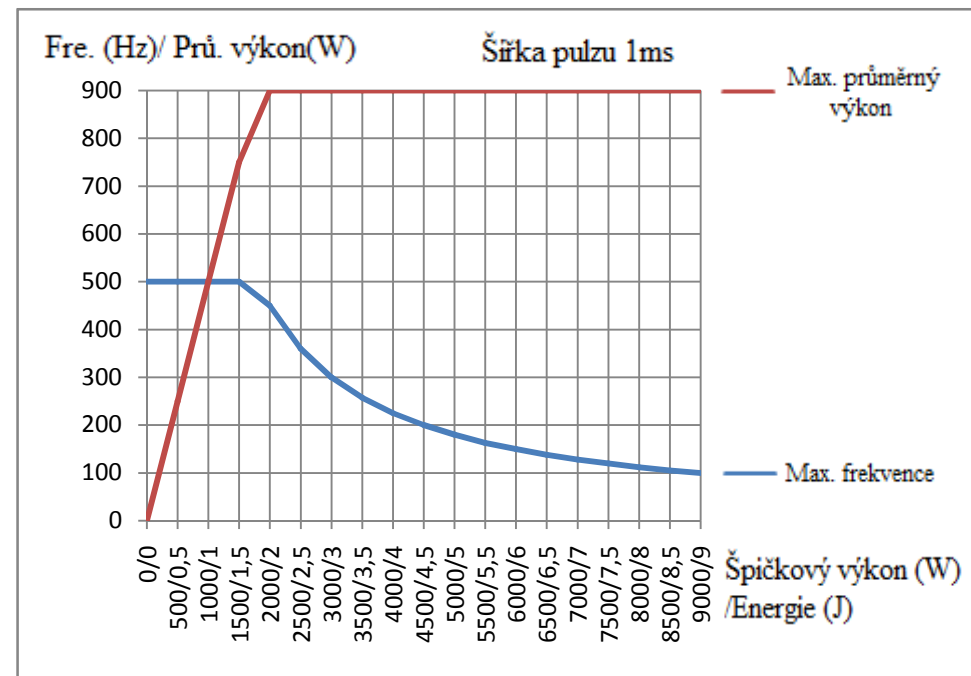
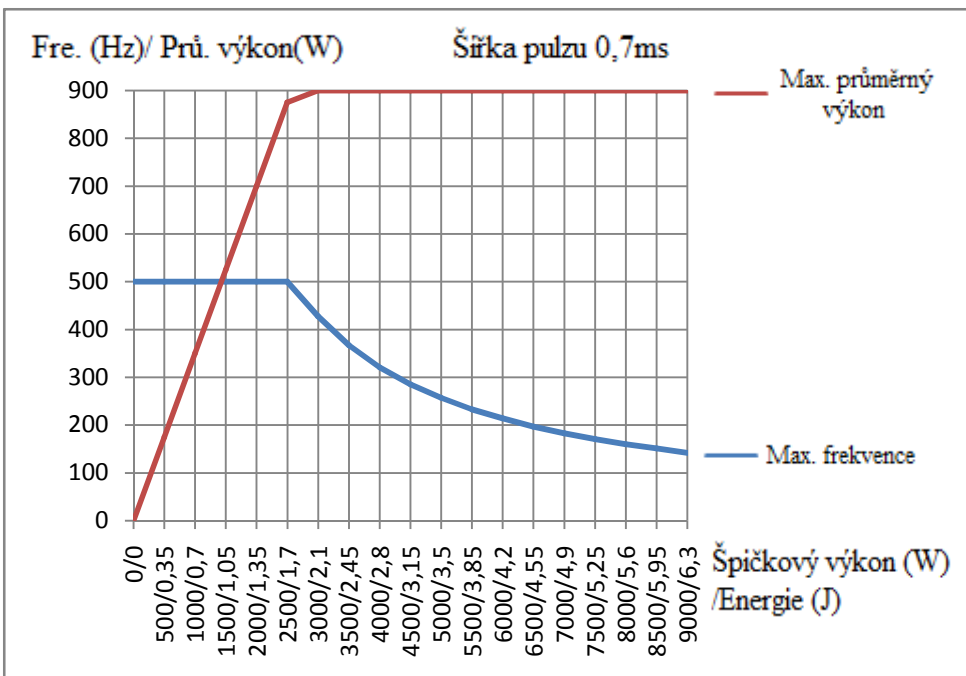
Seznam grafů

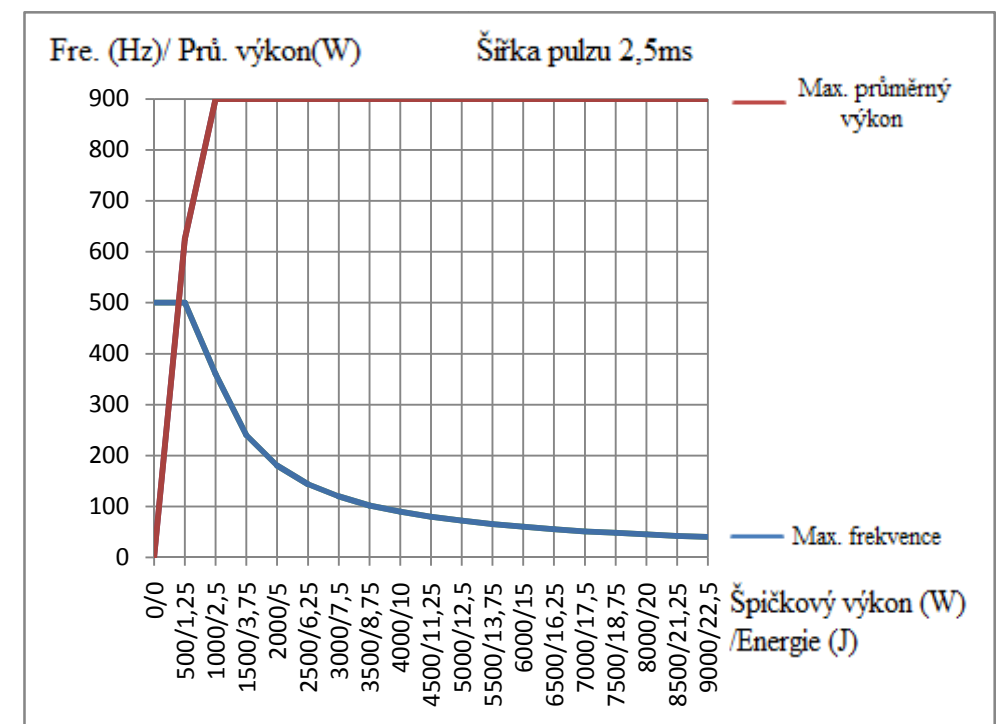
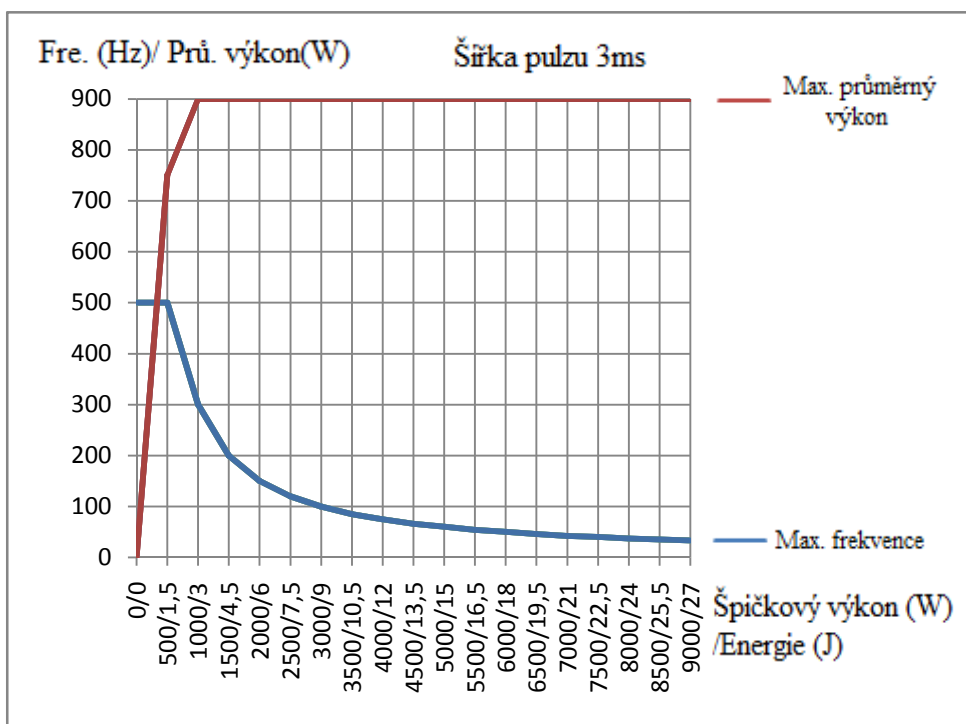
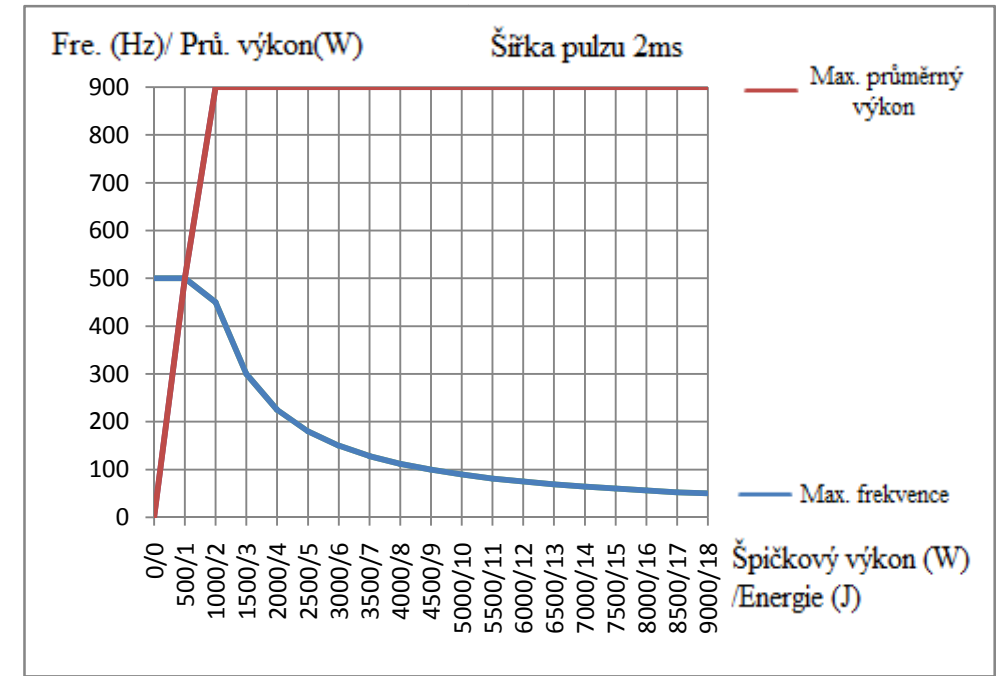
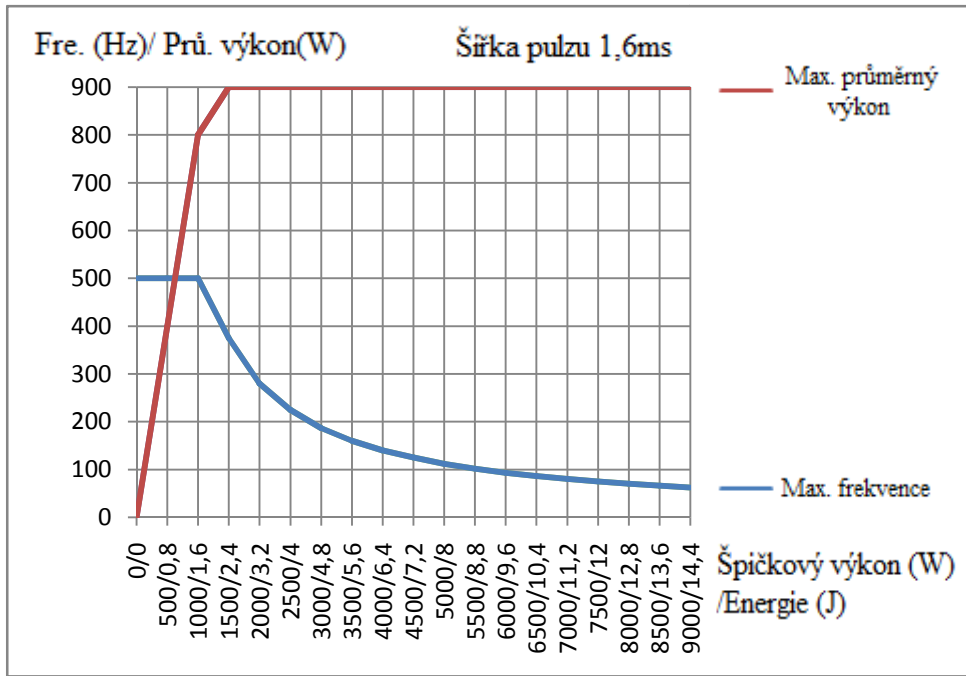
Graf 1 - <i>Současná oblast řezných parametrů pro šířku pulzu 0,2ms</i>	40
Graf 2 - <i>Současná oblast řezných parametrů pro šířku pulzu 0,3ms</i>	41
Graf 3 - <i>Současná oblast řezných parametrů pro šířku pulzu 0,5ms</i>	41

Příloha č. 1

Špičkový výkon (W)	Šířka Pulza (ms)											
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1	1,2	1,4	1,6	2	2,5	3
	Energie (J) /Průměrný výkon (W)											
	Max. frekvence (Hz)											
0	0/0 500	0/0 500	0/0 500	0/0 500	0/0 500	0/0 500	0/0 500	0/0 500	0/0 500	0/0 500	0/0 500	0/0 500
500	0,1/50 500	0,15/75 500	0,2/100 500	0,25/125 500	0,35/175 500	0,5/250 500	0,6/300 500	0,7/350 500	0,8/400 500	1/500 500	1,25/625 500	1,5/750 500
1000	0,2/100 500	0,3/150 500	0,4/200 500	0,5/250 500	0,7/350 500	1/500 500	1,2/600 500	1,4/700 500	1,6/800 500	2/900 450	2,5/900 360	3/900 300
1500	0,3/150 500	0,45/225 500	0,6/300 500	0,75/375 500	1,05/525 500	1,5/750 500	1,8/900 500	2,1/900 428	2,4/900 375	3/900 300	3,75/900 240	4,5/900 200
2000	0,4/200 500	0,6/300 500	0,8/400 500	1/500 500	1,4/700 500	2/900 450	2,4/900 375	2,8/900 320	3,2/900 280	4/900 225	5/900 180	6/900 150
2500	0,5/250 500	0,75/375 500	1/500 500	1,25/625 500	1,75/875 500	2,5/900 360	3/900 300	3,5/900 257	4/900 225	5/900 180	6,25/900 144	7,5/900 120
3000	0,6/300 500	0,9/450 500	1,2/600 500	1,5/750 500	2,1/900 458	3/900 300	3,6/900 250	4,2/900 214	4,8/900 187	6/900 150	7,5/900 120	9/900 100
3500	0,7/350 500	1,05/525 500	1,4/700 500	1,75/875 500	2,45/900 367	3,5/900 257	4,2/900 214	4,9/900 183	5,6/900 160	7/900 128	8,75/900 102	10,5/900 85
4000	0,8/400 500	1,2/600 500	1,6/800 500	2/900 450	2,8/900 321	4/900 225	4,8/900 187	5,6/900 160	6,4/900 140	8/900 112	10/900 90	12/900 75
4500	0,9/450 500	1,35/675 500	1,8/900 500	2,25/900 400	3,15/900 285	4,5/900 200	5,4/900 166	6,3/900 142	7,2/900 125	9/900 100	11,25/900 80	13,5/900 66
5000	1/500 500	1,5/750 500	2/900 450	2,5/900 360	3,5/900 257	5/900 180	6/900 150	7/900 128	8/900 112	10/900 90	12,5/900 72	15/900 60
5500	1,1/550 500	1,65/825 500	2,2/900 410	2,75/900 327	3,85/900 233	5,5/900 163	6,6/900 136	7,7/900 116	8,8/900 102	11/900 89	13,75/900 65	16,5/900 54
6000	1,2/600 500	1,8/900 500	2,4/900 375	3/900 300	4,2/900 214	6/900 150	7,2/900 125	8,4/900 107	9,6/900 93	12/900 75	15/900 60	18/900 50
6500	1,3/650 500	1,95/900 460	2,6/900 345	3,25/900 277	4,55/900 197	6,5/900 138	7,8/900 115	9,1/900 98	10,4/900 86	13/900 69	16,25/900 55	19,5/900 46
7000	1,4/700 500	2,1/900 425	2,8/900 320	3,3/900 257	4,9/900 183	7/900 128	8,4/900 107	9,8/900 91	11,2/900 80	14/900 64	17,5/900 51	21/900 42
7500	1,5/750 500	2,25/900 400	3/900 300	3,75/900 240	5,25/900 171	7,5/900 120	9/900 100	10,5/900 85	12/900 75	15/900 60	18,75/900 48	22,5/900 40
8000	1,6/800 500	2,4/900 375	3,2/900 280	4/900 225	5,6/900 160	8/900 112	9,6/900 93	11,2/900 80	12,8/900 70	16/900 56	20/900 45	24/900 37
8500	1,7/850 500	2,55/900 350	3,4/900 265	4,25/900 212	5,95/900 151	8,5/900 105	10,2/900 88	11,9/900 75	13,6/900 66	17/900 52	21,25/900 42	25,5/900 35
9000	1,8/900 500	2,7/900 333	3,6/900 250	4,5/900 200	6,5/900 142	9/900 100	10,8/900 83	12,6/900 71	14,4/900 62	18/900 50	22,5/90 40	27/900 33







Příloha č. 2

G71 ; METRIC MODE
G72 ; PSC ON
M86 ; LOCK ON
G4X2
G1F2000

;*****POZICE*****

G99

;*****POZICE*****

V32=500 ; NAJIZDECI+ODJIZDECI POSUV
V33=500 ; RYCHLOST ŘEZU (POSUV)
V51=0 ; POSUNUTI X
V52=0 ; POSUNUTI Y
V53=0 ; POSUNUTI Z
V54=0 ; POSUNUTI U

M51M52X0.0002M53X250PK6000 ;LASEROVÉ PARAMETERY
;Šířka pulzu 0,2 frekvence 250 špi. výkon 6000

;G75N20F300 ; TENTO PRIKAZ OMEZI RYCHLOST POSUVU LINEARNICH OS .
G86N20D.125 ; ZPUSOBI RYCHLEJSI POHYB STROJE.

G76
G05
PR10 ; TLAK PLYNU
G92 XV51 YV52 ZV53 UV54
G04X4

;*****

M300
G04 X.5
M100
G04 X.2
N1 G00
N2 G00 X+68.000 Y+7.925 Z+15.000
N3 Z+2.500
N4 G01 Z+0.000 FV32
M60 ; BEAM ON
G04X.2
G07
G01 FV33
N5 X+12.000 Y+7.925 Z+0.000 D-90.000 C-90.000 FV33
G05
M61 ; BEAM OFF
G04X0.2

N6 G00 X+12.000 Y+7.925 Z+15.000 D-90.000 C-90.000
N7 G00
N8 X-0.075 Y+0.000
N9 Z+2.500
N10 G01 Z+0.000 FV32
M60 ; BEAM ON
G04X.2
G07
G01 FV33
N11 X-0.075 Y+15.000 Z+0.000 D-90.000 C-90.000 FV33
N12 G02 X+0.000 Y+15.075 I+0.075 J+0.000
N13 G01 X+15.000
N14 G02 X+15.075 Y+15.000 I+0.000 J-0.075
N15 G01 Y+13.075
N16 X+15.500
N17 G02 X+15.575 Y+13.000 I+0.000 J-0.075
N18 G01 Y+2.000
N19 G02 X+15.500 Y+1.925 I-0.075 J+0.000
N20 G01 X+15.075
N21 Y+0.000
N22 G02 X+15.000 Y-0.075 I-0.075 J+0.000
N23 G01 X+1.000
G05
M61 ; BEAM OFF
G04X0.2
N24 G00 X+1.000 Y-0.075 Z+15.000 D-90.000 C-90.000
M101
G04 X.2
M301 ; GAS OFF
G04 X.2
M87
M02 ; KONEC PROGRAMU