



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NASAZENÍ ŘEZÁNÍ LASEREM PŘI VÝROBĚ SOUČÁSTÍ MANIPULAČNÍ TECHNIKY

THE LASER BEAM USE IN A PRODUCTION OF PARTS FOR MANIPULATING TECHNIQUE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MAREK POLÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Marek Polák

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

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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

Nasazení řezání laserem při výrobě součástí manipulační techniky

v anglickém jazyce:

The laser beam use in a production of parts for manipulating technique

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nasazení řezání laserem při výrobě součástí manipulační techniky firmě Manex & Co.

Cíle diplomové práce:

Rozbor součástkové základny ve firmě z hlediska technologičnosti konstrukce.

Rozbor technologických možností řezání laserem paprsku.

Kompletní řešení technologie pro konkrétní součástku.

Ekonomické vyhodnocení.

Seznam odborné literatury:

1. BARCAL, J. Nekonenční metody obrábění, Skriptum FSI ČVUT Vydavatelství ČVUT, Praha 1989.
2. KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění, Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. MAŇKOVÁ, I., Progresivní technologie, Viena Košice, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
4. OBERG, E., JONES, F.D., HORTON, H.L., RYFFEL, H.H. Machinery's hand-book. 25th Edition. Industrial Press Inc. New York, 1996. 2547 s. ISBN 0-8311-2595-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 19.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o laseru a jeho nasazení do výrobní sféry. Popisuje stručně princip, funkci a možnosti laseru a to převážně nasazení laseru při obrábění. Cíleně je zaměřena na možnosti nasazení laseru při řezání. Diplomová práce byla zpracována v rámci firmy Manex & Co, a. s., výrobce manipulační techniky. Ta disponuje CNC řezacím zařízením Bystronic, a ve svém provozu ji plně využívá. V rámci diplomové je vyráběno řetězové kolo z oceli ČSN 41 1373.

Klíčová slova:

Laser, funkce, řezání, technologie

ABSTRACT:

This Diploma thesis treats of laser and his localisation in production sphere. It briefly describes principle, function and possibilities of laser, mainly laser technology by machining. It targets the possibilities of laser by cutting. The diploma thesis was elaborated in conjunction with the company Manex & Co, a. s., producer of handling systems. It disposes of CNC cutting machinery, which is fully engaged. A chain gear from ČSN 41 1363 was produced in terms of this diploma thesis.

Key words:

Laser, function, cutting, technology

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLÁK, Marek. *Nasazení laseru při výrobě manipulační techniky*: Diplomová práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 65s., 5příloh, Vedoucí práce Ing. Karel Osička

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma nasazení řezání laserem při výrobě součástí manipulační techniky, vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 26.5.2009

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji panu Ing. Karlu Osičkovi za odbornou pomoc a cenné rady při tvorbě diplomové práce.

Děkuji firmě Manex & Co., a.s., zvláště pak p. Ladislavu Cichrovi, za pomoc při realizaci praktické části diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 CHARAKTERISTIKA.....	8
1.1 LASER –obecné vysvětlení.....	8
1.2 Historie laseru.....	10
1.3 Obecné rozdělení laserů.....	11
1.4 Princip laseru.....	14
1.5 Rozdělení laserů dle aktivního prostředí.....	16
2 VYUŽITÍ LASERU.....	19
2.1 Technologie využívající paprsku laseru.....	19
2.2 Využití laserového paprsku ve strojírenství.....	19
2.3 Metody oddělování (úběru) materiálu pomocí laserového paprsku.....	20
2.3.1 Rozdělení.....	20
2.3.2 Laserové obrábění.....	21
2.3.2.1 Vrtání pomocí laseru.....	21
2.3.2.2 Mikroobrábění.....	21
2.3.2.3 Soustružení.....	21
2.3.2.4 Dokončovací metody.....	22
2.3.2.5 Využití průmyslových laserů při řezání.....	22
3 DĚLENÍ MATERIÁLU LASEREM.....	23
3.1 Účinek paprsku na materiál.....	23
3.2 Proces dělení.....	23
3.2.1 Rozdělení dle technologie.....	23
3.2.2 Technické plyny.....	24
3.2.3 Lasery vhodné pro řezání.....	25
3.2.3.1 CO ₂ lasery.....	25
3.2.3.2 Nd-YAG Laser.....	26
3.2.3.3 Excimerové lasery.....	26
3.2.4 Způsoby řezání.....	27
3.2.5 Možnosti řezání laserem z hlediska materiálu.....	29
3.2.5.1 Kovové materiály.....	29
3.2.5.2 Neželezné kovy (titan, hliník, měď, nikl).....	30
3.2.5.3 Nekovové materiály (kompozity, keramika, plasty).....	30
3.3 Základní charakteristiky procesu řezání laserem.....	31
4 VÝROBA SOUČÁSTÍ MANIPULAČNÍ TECHNIKY POMOCÍ LASERU – MANEX & Co., a. s.....	32
4.1 Stručný popis výroby a výrobků.....	32
4.2 Laser Bystronic.....	33
4.2.1 Základní údaje.....	33
4.2.2 Konstrukce laseru.....	34
4.3 Rozbor součástkové základny z hlediska použitých materiálů.....	36
4.3.1 Řezání konstrukční ocele.....	36
4.3.1.1 Řezání konstrukční ocele s kyslíkem (O ₂).....	36
4.3.1.2 Řezání konstrukční ocele s dusíkem (N ₂).....	36

4.3.2.3	Použité konstrukční ocele při pálení na laseru ve fy. Manex & Co., a. s.....	37
4.3.2	Řezání bez oxidů do ocele odolné proti korozi a kyselinám.....	38
4.3.3	Bezoxidové řezání hliníkových slitin.....	40
4.3.4	Další materiály.....	42
4.3.5	Materiály nevhodné pro řezání.....	42
4.4	Rozbor součástkové základny z hlediska geometrie a tvaru vyráběných součástí.....	42
4.5	Rozbor součástkové základny z hlediska přesnosti vyráběných součástí.....	43
4.5.1	Přesnost laserového řezání na laseru Bystronic.....	43
4.5.2	Přesnost vyrobených dílců.....	44
4.6	Technologické možnosti při výrobě součástí.....	45
4.6.1	Gravírování.....	45
4.6.2	Řezání pomocí makra.....	46
4.6.3	Možnosti režimů.....	46
5	TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY SOUČÁSTI, PRAKTICKÁ ČÁST.....	48
5.1	Výroba řetězového kola pro řetěz 12B1.....	48
5.1.1	Popis kola.....	49
5.1.2	Možnosti polotovaru.....	49
5.1.3	Postup výroby.....	49
5.2	Výroba testovacích kusů.....	50
5.3	Kontrola výpalů.....	57
5.4	Zhodnocení výpalů.....	61
6	TECHNICKO - EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	62
6.1	Spotřeba plynů.....	63
6.2	Výpočet fixních nákladů.....	64
6.3	Výpočet variabilních nákladů.....	64
6.4	Celkové náklady na 1 sekundu provozu laseru.....	65
6.4.1	Celkové náklady na pálení za 1 sekundu při použití dusíku.....	65
6.4.2	Celkové náklady na pálení za 1 sekundu při použití kyslíku.....	66
6.5	Ekonomické zhodnocení vyráběného řetězového kola.....	66
6.5.1	Výpočet nákladů při výrobě na CNC laserovém zařízení Bysprint 3015.....	66
6.5.2	Porovnání s dalšími variantami výroby.....	68
6.5.2.1	Výroba frézováním.....	68
6.5.2.2	Výroba vodním paprskem.....	68
	ZÁVĚR.....	69
	POUŽITÁ LITERATURA.....	70
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	73
	SEZNAM PŘÍLOH.....	74

ÚVOD

Laserové řezání se stále zařazuje mezi metody nekonvenčního obrábění. Nekonenční proto, že je to metoda, kde úběr materiálu je založen na využití fyzikálních resp. fyzikálně – chemických procesech, Nevyužívá tedy pro úběr materiálu mechanické práce. Další odlišností je, že jde o metodu beztržiskového obrábění. [13]

Na jednu stranu zařazení laseru mezi nekonvenční metody je přípustné, protože stále patří mezi metody relativně nové a stále se zdokonalují. Vedle klasického oddělování materiálu se uplatňuje i u dalších metod obrábění a jeho nasazení je možno zaznamenat v mnoha oborech a to nejen ve strojírenství, ale například i v lékařství nebo v metrologii. Jeho vývoj se posunuje stále dopředu, to je možno pozorovat např. na stále větších tloušťkách materiálů, které je možno dělit. Na druhou stranu, jde o metodu, která je velmi progresivní a v dnešním 21. století je nasazení laseru nebo jiné nekonvenční metody do výroby velmi obvyklé, protože splňuje podmínky optimální kvality a rychlosti výroby.

Cílem této diplomové práce je seznámení s metodou laserového obrábění, popis principu metody, a dále je zaměřena na metodu úběru materiálu pomocí laseru. Práce je zaměřena na rozbor součástkové základny při výrobě manipulační techniky metodou laseru.

Výrobce této techniky je firma Manex & Co., a.s. Firma se zabývá vývojem, projekcí a výrobou manipulační techniky a technologického zařízení pro manipulaci s obaly, polotovary a hotovými výrobky. Zabezpečuje kompletní realizaci každé zakázky (od technické přípravy, výrobu, montáž až po programování a servis). Jako příklad referencí lze uvést Pivovary Staropramen a.s., Starobrna, a.s., Bohemia Sekt - Českomoravská vinařská, a.s., Molkerei Alois Müller GmbH & Co. KG. [16]

A právě laserové řezání patří mezi jednu z nejdůležitějších metod výroby této firmy. A to z důvodu téměř kusové výroby. Zde je nasazení laseru velmi výhodné.

Dalším bodem této diplomové práce je zaměření se na výrobu součástí složitých tvarů, z tabulí tloušťek větších jak 10mm.

1 CHARAKTERISTIKA

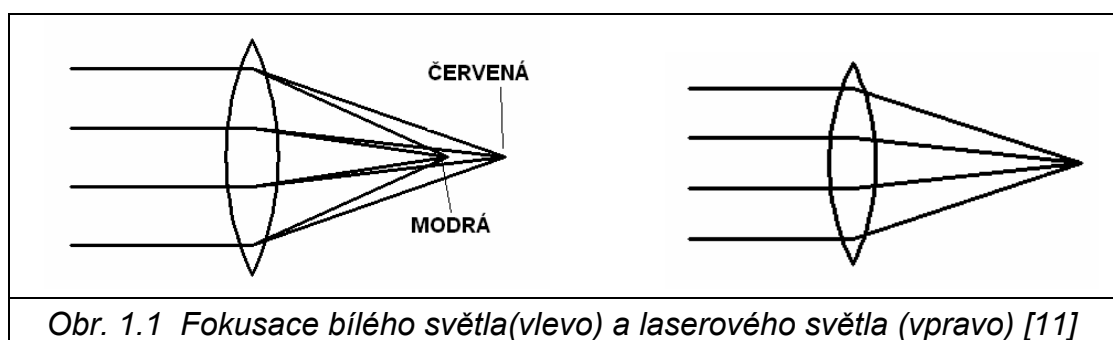
1.1 Laser – obecné vysvětlení

Laser patří mezi poměrně mladé vynálezy – vynálezy 20. století.

Slovo LASER je zkratkou anglického výrazu *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, do češtiny přeloženo jako zesílení světla stimulovanou (vynucenou) emisí záření. Přesný český název je kvantový generátor světla. Z názvu je jasné, že jde o optický zdroj elektromagnetického záření – tedy zdroj jistého druhu světla, který má svá specifika.[1,20]

Od běžného světla se odlišuje tím, že[1,2,11,24];:

- je monochromatické (jednobarevné) - má jen jednu vlnovou délku, na rozdíl od bílého světla jej lze soustředit do jednoho bodu (u bílého světla má každá barva při rozložení své vlastní ohnisko) viz obr. 1.1 ;



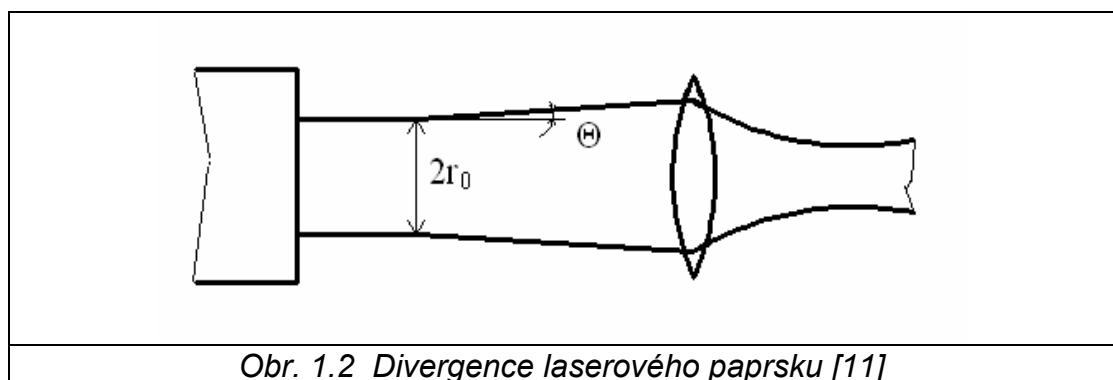
Obr. 1.1 Fokuse bílého světla(vlevo) a laserového světla (vpravo) [11]

- má malou divergenci (rozbíhavost) Θ – ta je charakterizovaná poloviční velikostí vrcholového úhlu kužele paprsku vlnové délky λ_w , vystupujícího z rovinného okénka laseru o poloměru r_0 ;

Divergence laserového paprsku - výpočet [11]

$$\Theta = \lambda_w / \pi r_0$$

(1.1)



Obr. 1.2 Divergence laserového paprsku [11]

- je koherentní (uspořádané – má jedinou fázi a frekvenci). Všechny částice světelné vlny kmitají v rovině kolmé na směr šíření paprsku se stejnou fází,
- má vysokou výstupní intenzitu. V následující tabulce 1.1 jsou srovnány hustoty výkonů vybraných zdrojů energie,

Výstupní intenzita laserového paprsku [11]

$I = I_0 \cdot \exp(-2r^2 - r_0^2)$	(1.2)
-------------------------------------	---------

Tab.1.1 Dosahované hustoty vybraných zdrojů [11]

Zdroj energie	Dosáhnutelná hustota výkonu [W/cm ²]
Slunce	$5 \cdot 10^2$
Elektrický oblouk	$1 \cdot 10^5$
Acetylen - kyslíkový plamen	$1 \cdot 10^4$
Plazmový paprsek	$1 \cdot 10^5$
Elektronový paprsek	$4 \cdot 10^8$
CO2 laser cw	$1 \cdot 10^9$
Nd laser pw	$1 \cdot 10^{14}$

- má módovou strukturu tzv. TEM (transverse electromagnetic mode). Paprsek vytváří jednoduchou stopu, nebo kruhově symetrické obrazce, v příčném průřezu. [11]

Princip laseru tedy obecně využívá zákonů termodynamiky a kvantové mechaniky. [2]

1.2 Historie laseru

- 1916 - Albert Einstein vysvětluje princip indukované (stimulované) emise, na které je založena činnost laseru, [1]
- 1925 - anglický fyzik Paul Adrien Maurice Dirac provedl detailnější matematickou analýzu kvantové teorie a tím dále rozvinul Einsteinovy myšlenky, [1]
- 1958 - Charles Hard Townes (nositel Nobelovy ceny za fyziku) provedl se svými spolupracovníky výpočty, které umožnily tuto myšlenku realizovat, [1]
- 1959 – začínají se studovat vlastnosti rubínu (jeden z nejušlechtilějších drahých kamenů). A to z důvodu jeho důležité vlastnosti – fotoluminiscence, [1]
- 1960 - americký fyzik Theodor Maiman vyleštil koncové stěny krystalu umělého rubínu a opatřil je vrstvičkou stříbra - ve funkci zrcadla. Po ozáření krystalu zeleným světlem pronikl jedním ze zrcadel červený paprsek laserového světla. [1]

Tento první kvantový generátor byl pojmenován jako Maser (z anglického "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation", tj. zesilování mikrovln pomocí stimulované emise záření) a je označován za předchůdce laseru. Maser je zařízení zesilující a generující mikrovlnné elektromagnetické záření na základě stimulované emise, tedy na stejném principu jako laser. [8]

Používá se stále především v radioteleskopech jako bezšumový zesilovač signálu nebo jako atomové hodiny. [8]

Druhy maserů se dělí podle skupenství a látky samotné, jejíž atomy či molekuly tvoří aktivní prostředí, v němž dochází ke stimulované emisi. [8]

Běžnými typy maserů jsou [8]:

- o Masery s proudem atomů
- o Čpavkový maser
- o Vodíkový maser – dnes asi nejvýznamnější maser, který se používá jako atomové hodiny dosahující minimální odchylky (1ns za den)
- o Plynné masery
- o Rubidiový maser
- o Pevnolátkové masery
- o Rubínový maser.

1.3 Obecné rozdělení laserů

Lasery lze rozdělit do různých kategorií podle:

- materiálu, z kterého je získán laserový efekt[10]:
 - o pevnolátkové,
 - o kapalinové,
 - o plynové,
 - o polovodičové;
- způsobu čerpání energie[10, 25]:
 - o elektricky,
 - o opticky,
 - o chemicky,
 - o termodynamicky;
- vyzařované vlnové délky[10]:
 - o infračervené,
 - o ultrafialové,
 - o rentgenové a gama záření,
 - o v oblasti viditelného světla;
- výkonu[11]:
 - o nízkovýkonové - desetiny až stovky Wattů,
použití: obrábění keramiky, rubínu, plastických hmot,
 - o Vysokovýkonové – 1kW – 30kW,
použití: tepelné zpracování, svařování;
- druhu paprsku[11]:
 - o cw (continuous wave) - kontinuální režim,
 - o pw (pulsed wave) – pulzní režim - vzniká přerušováním elektrického výboje v dutině laseru,
 - o Q – switched – kontinuální režim s vysokou energií pulzu – vzniká při kontinuálním čerpání energie zvyšováním jakosti optického rezonátoru. V tomto režimu je dosaženo nejvyšší hustoty výkonu paprsku.

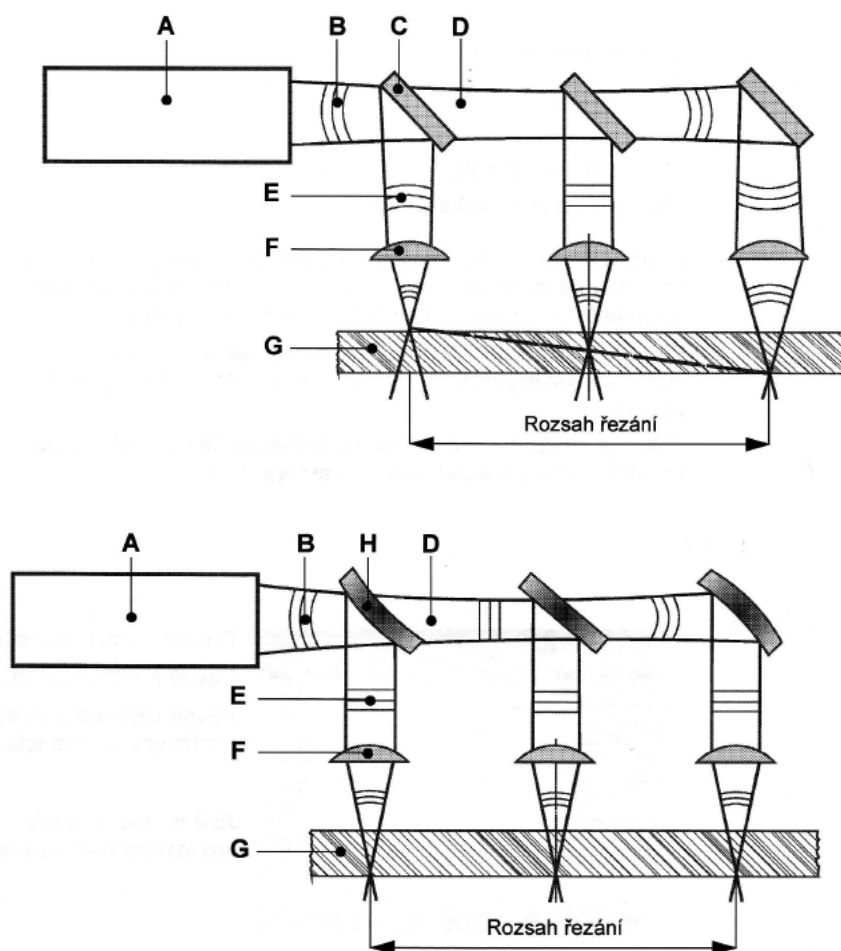
- použití[10, 21]:
 - o vojenské,
 - o technologické,
 - o energetické,
 - o výzkumné,
 - o měřicí,
 - o lékařské;
- konstrukce[11]:
 - o pohyblivý laserový systém a nepohyblivý obrobek,
 - o pohyblivý stůl s obrobkem a nepohyblivý systém laseru,
 - o jak systém laseru, tak i stůl s obrobkem jsou stacionární, pohyb paprsku je uskutečněn pomocí zrcadel. Má své výhody i nevýhody :
 - + vysoké řezné rychlosti,
 - + úspora prostoru,
 - citlivost na vibrace a nastavení,
 - větší rozptyl paprsku.

U těchto typů laserů s tzv. „létající optikou“, kde materiál je na místě a řezací hlava se pohybuje se k odstranění nevýhody rozptylu paprsku a pro dodržení kvality řezu používá přídatných systémů. Např. u laserů firmy Bystronic jde o tzv. systém BYPOS W. [12]

U systému s pohyblivou optikou se s délkou laserového paprsku mění poloha ohniska. Jak již bylo řečeno, jednou z důležitých vlastností paprsku je jeho divergence, ta způsobuje tuto změnu polohy ohniska – čím větší je vzdálenost mezi čočkou v řezací hlavě a výstupním oknem z rezonátoru, tím níže se ohnisko posunuje. Tento proces je ukázán na obr. 1.3. [12]

Systém BYPOS funguje na principu přizpůsobivé čočky, která udržuje všechny parametry stálosti parametrů ohniska, nezávisle na podmínkách okolního prostředí. [12]

Princip: deformovatelné zrcadlo – vychyluje paprsek o 90° - povrch zrcadla se deformuje pomocí tlaku chladicí kapaliny. Pomocí senzoru v zrcadle se reguluje tlak kapaliny, tak aby došlo k dané deformaci zrcadla. [12]



Obr 1.3 Schéma BYPOS W [12]

Každý z těchto laserů je odlišný z hlediska konstrukce, každý se tedy hodí pro jiný účel, tedy má uplatnění v různých činnostech.

Většina laserů s kterými se běžně setkáváme, jsou lasery malého výkonu pracující spojitě, tedy nepřetržitě. Příklady přístrojů využívající kontinuální laser: laserová ukazovátka, laserové tiskárny, kopírky, CD-ROM mechaniky a další. [1]

Při sváření, řezání, vrtání či chirurgii je určující charakteristikou výkon laseru, proto se zde uplatňují impulsní lasery. Výkon laseru totiž také závisí na délce laserového pulsu, a tak čím bude puls kratší, tím větší bude výkon. Zkracování délky pulsu vedlo až k několika nanosekundám, čímž se docílilo výkonu srovnatelného s malými elektrárnami. [1]

1.4 Princip laseru

Princip laseru je založen na planetárním modelu atomu [13]:

Kolem jádra každého atomu, jež je kladně nabitě, krouží elektrony. Obíhají kolem jádra po uzavřených drahách. Vlivem opačné polarizace jádra a elektronů, podléhají elektrony elektrostatickým silám. Jednotlivým drahám odpovídá určitá velikost energie. Jiný možnost není – neexistují přechodné dráhy. Každá dráha odpovídá tedy určité energetické hladině. Čím dále se nachází daná dráha od jádra atomu, tím více energie jí přísluší. Za normálních podmínek se elektron nachází v tzv. základním stavu – tzn. v kvantovém stavu s nejmenší energií. Elektrony tedy v základním stavu obíhají po dráze nejbližší k jádru (s nejmenším poloměrem).

Přechod elektronu do jiného kvantového stavu je doprovázeno určitým kvantem energie, které je absorbováno nebo emitováno [2]:

Tato velikost kvanta energie E se rovná frekvenci záření f , viz. (1.2)

Kvantová teorie světla [11, 13]

$$E_2 - E_1 = h \cdot f$$

(1.3)

Tělo laseru vytváří rezonátor, zdroj energie a aktivní prostředí.

Zdrojem energie je například výbojka. Vytváří energii a dodává ji do aktivního prostředí. Zde, v aktivním prostředí dojde k excitaci - dodaná energie vybudí elektrony (ze základní energetické hladiny do vyšší energetické hladiny). Tak vzniká tzv. inverze populace – většina elektronů aktivního prostředí je vybudena do vyšších stavů. [2]

Při přestupu elektronu zpět na nižší energetickou hladinu, dojde k emisi energie – vyzáření určitého množství energie formou fotonů. Ty reagují s dalšími elektrony inverzní populace – nastane tzv. stimulovaná emise fotonů se stejnou fází a frekvencí. [2]

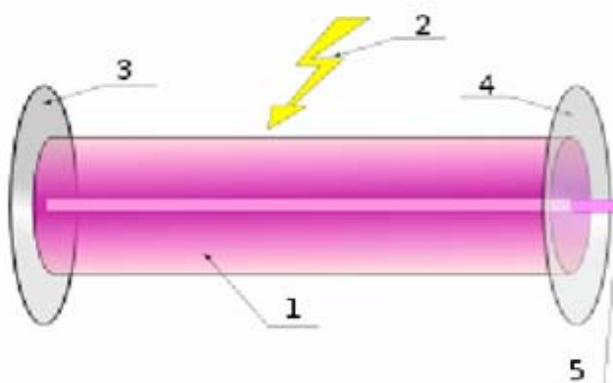
Emise nastává jedním ze dvou mechanismů:

- Spontánní emise – foton se vyzáří samovolně (při nízkém stupni obsazení vyšší vrstvy), atom přejde do svého základního stavu za současné emise fotonu o energii hf . Tato událost tedy není spuštěna žádným vnějším vlivem. Např. vytváření světla v žárovce. [14]
- Stimulovaná emise – stimulovaná proto, že tato událost je spouštěna vnějším fotonem. Dochází ke zkopírování fotonu procházejícího atomem [2] - světlo o frekvenci dané rovnicí (1.2) ozáří atom v excitovaném stavu. Foton o této energii stimuluje atom, který tak přejde do základního stavu a emituje další foton. Tímto způsobem je spuštěna řetězová reakce. [14]

Aktivní prostředí je umístěno v rezonátoru - tvořeno například pomocí optické dutiny vymezené zrcadly. Obsahuje kvantové energetické hladiny elektronů. [2]

Obvykle je rezonátor tvořen dvěma zrcadly, jedno je částečně propustné a druhé zcela odrazivé. Používají se většinou dielektrická zrcadla. Další možností je použití leštěného kovu – např. zlata. Méně známé je použití laserových diod, ty využívají už odrazivosti samotného aktivního prostředí se vzduchem. Zrcadla se používají rovinná, konkávní nebo konvexní. Stabilita záření závisí na poloměru zrcadel a délce rezonátoru. Dojde k odrazu paprsků fotonů a dalšímu průchodu prostředím. Tok fotonů se exponenciálně zesiluje. Paprsek vychází z těla laseru přes polopropustné zrcadlo. [2]

Existují také výjimky jako je dusíkový nebo měděný laser. Ten pracuje tzv. superradičně – záření stačí jeden průchod skrze aktivní prostředí k získání potřebné energie, takže rezonátor nepotřebují. [2]



- 1) Aktivní prostředí
- 2) Zdroj záření
- 3) Odrazné zrcadlo
- 4) Polopropustné zrcadlo
- 5) Laserový paprsek

Obr. 1.4 Rezonátor [2]

1.5 Rozdělení laserů dle aktivního prostředí [2, 3, 9]

Aktivní prostředí je tvořeno látkou, která obsahuje oddělené kvantové energetické hladiny elektronů.

Látkami mohou být:

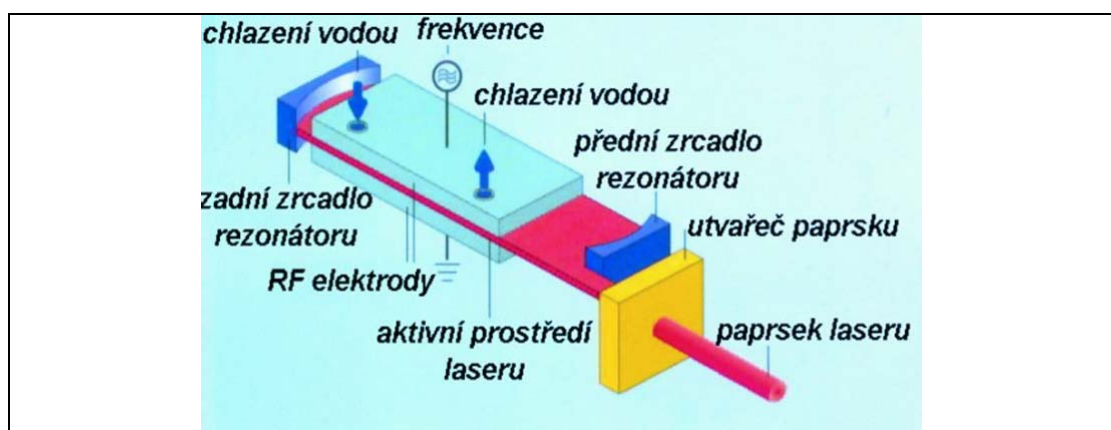
- organická barviva – kapalinové lasery – využívají se ve spektrometrii, z důvodu jejich možnosti přeladění vlnové délky. Toto přeladění lze vytvořit dvěma způsoby:
 - o pomocí difrakční mřížky – natočením této mřížky se mění barva výsledného světla,
 - o lze tuto mřížku vynechat a výstupní paprsek laseru lze rozložit např. hranolem.

Aktivní prostředí tvoří různá barviva (např. Rhodamin, Alizarin, Fluorescein, a další) rozpuštěné v destilované vodě, lihu nebo ve skle,

- polovodičové mustlivrstvy – kvantové kaskádní lasery,
- plyn – plynové lasery. Aktivním prostředím plynového laseru je plynná fáze. Pracují jak v souvislém, tak i pulzním režimu;

Typy dle [2, 3]:

- o CO₂ lasery – použití v technologii opracování materiálů – svařování a řezání - obr.1.5,
- o excimerové lasery - použití pro vrtání děr od průměru 10 μm, mikroobrábění keramických materiálů, obrábění diamantu, čištění povrchu strojních součástí nebo uměleckých děl, popisování,
- o vodíkový laser,
- o dusíkový laser,
- o helium- kadmiový laser
- o helium – neonový laser – použití např. v měřící technice,
- o měděný laser,
- o jódový laser,
- o argonový laser.



Obr. 1.5 Princip činnosti CO₂ laseru [3]

- monokrystal – hladiny vznikají dopováním – pevnolátkové lasery. Aktivním prostředím je tedy pevná, ale opticky propustná látka jako je sklo, keramika, krystaly, oxidy, granáty, fosfáty, silikáty, a další;

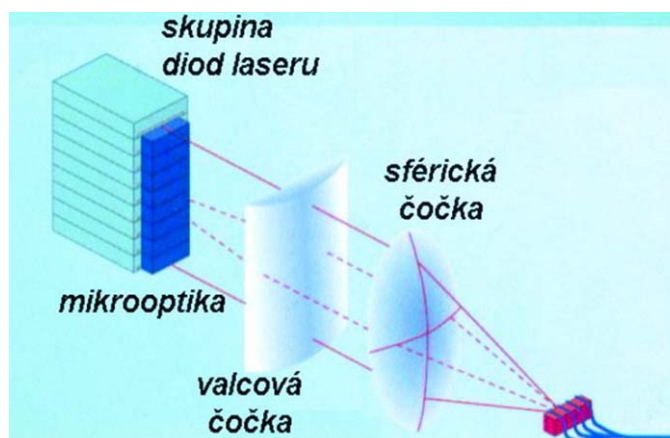
Představitelé pevnolátkových laserů:

- o neodymový laser,
- o rubínový laser – je typickým představitelem – byl totiž vůbec první fungující laser na světě. Využívá se krystal rubínu růžové barvy (ne tmavě červené). Pro buzení se využívá xenonové výbojky. Laser pracuje v pulzním režimu – v jedné miliontině sekundy vytvoří výkon milionu wattů;
- o Nd: YAG laser (itriumaluminiový granát) nejvíce používaný laser ze skupiny pevnolátkových laserů. Pracuje v pulzním i kontinuálním režimu. Vhodný pro vrtání, řezání, svařování, popisování.
V lékařství má použití ve dvou oborech: chirurgii jako skalpel a v oční mikrochirurgii. Dále se uplatnil ve spektroskopii a radarové technice.
Velký rozvoj zaznamenávají tyto lasery, kde se ale dosud používané výbojky, které jsou používané pro čerpání energie z krystalu nahrazují laserovými diodami. Výhodou je vyšší účinnost, menší spotřeba elektrické energie tedy menší provozní náklady, menší rozměry, a delší trvanlivost diod oproti výbojkám;
- o kotoučový laser – krystal typu válce nebo desky je nahrazen kotoučem (tloušťky 0,3mm, průměru 7mm). Mají také vyšší účinnost oproti ostatním pevnolátkovým laserům – až 91%. Pracují v pulzním i kontinuálním režimu. Použití: značení, vrtání mikrootvorů, svařování, mikrožezání, popisování;

- polovodič – p-n přechod – diodové lasery;
Generují světlo ve dvou vlnových délkách červeného světla: 692,9nm a 694,3nm
Polovodičový materiál je aktivním prostředím, ve kterém tvoří aktivní částice volné elektrony a díry.
Tyto lasery mají velkou účinnost pohybující se kolem 50%.
Další předností je možnost generace záření různých vlnových délek.

Typičtí představitelé:

- o polovodičový laser buzený svazkem elektronů – výstupní výkon 30W – 6kW. Vysoce výkonné diodové lasery mají paprsek tvaru obdélníkové plochy,
- o injekční polovodičový laser buzený elektrickým polem – použití: zvláště pro tepelné zpracování, svařování nebo nanášení povlaků – obr.1.6,



Obr. 1.6 Konstrukce polovodičového laseru [3]

- kovové páry – využití kovových par vzácných prvků, např. lasery pracující na principu měděných (Cu) par. Používají se při vrtání děr o průměru 50 až 200 μm (rychlost vrtání je velká a tepelné ovlivnění materiálu v okolí vrtané díry je velmi malé, drsnost stěny vrtané díry je 1 až 2 μm), řezání křemíkových desek, folií, vytváření mřížek.

2 VYUŽITÍ LASERU

2.1 Technologie využívající paprsku laseru [3, 22]

- zpracování plechů – řezání, vrtání, svařování, ohýbání,
- obrábění - řezání drážek, obrábění dutin, vrtání, obrábění s předehřevem, popisování, dělení třísek, odhroťování, soustružení, frézování a mikrofrézování,
- tepelné zpracování - kalení, žíhání, popouštění, zpevnění s natavením, amorfizace povrchu a rázové zpevnění,
- povrchové úpravy - nanášení různých druhů povlaků a sycení povrchu legujícími prvky, leštění povrchů, vytváření textur,
- technologie Rapid Prototyping,
- měření - délek, tvaru, polohy obrobku, počítání počtu vyrobených kusů, měření jakosti povrchu, měření stavu opotřebení činné části nástroje,
- renovace opotřebovaných součástí a nástrojů – navařování,
- vyvažování součástí - úběr materiálu součásti v předem daném místě,
- měření stavu napjatosti součástí – holografie,
- dálkové řízení strojů,
- analýza chemického složení materiálů,
- vytváření textů na nedabovaných filmech,
- vytváření dekorací na a ve skleněných předmětech,
- renovace starých uměleckých děl – čištění,
- laserovou podporu konvenčního obrábění.

Každá ze zmíněných oblastí má svá specifika, pokud jde o typ laseru a způsoby použití.

Každý z těchto druhů laserů má své přednosti a omezení, co se týče jednotlivých aplikací.

2.2 Využití laserového paprsku ve strojírenství

Výběr možností použití laseru ve strojírenské výrobě a stručný popis:

- tepelné zpracování [3] – charakteristika: ohřev malé části materiálu po krátkou dobu,

metody:

- o žíhání, kalení, popouštění,
- o tepelné zpevnění s natavením – dochází k amorfizaci povrchu,
- o rázové zpevnění založené na odpařování materiálu.

Lasery: CO₂, diodové;

- svařování – výhody: vysoká produktivita, malá tepelně ovlivněná zóna, možnost svařování i jinak těžce svařitelných materiálů (slitiny hliníku, titan, zlata a další)[3] a materiály velkých tloušťek [6, 19]. Malé délkové deformace svařence [5], vysoká pevnost svaru [5], čistý svár [4],
- nanášení ochranných povlaků – nanášení pásů povlaku (kov, keramika) na materiál, vedle sebe nebo překrytím. Tloušťka povlaku je až 1mm [5],
- oddělování (úběr) materiálu – viz. následující kapitola 2.3.

2.3 Metody oddělování (úběru) materiálu pomocí laserového paprsku

2.3.1 Rozdělení

Dle [11] existují v současné době dva základní způsoby u nichž se využívá laserového paprsku k úběru materiálu:

- obrábění podporované laserem;

Aplikuje se pro klasické metody soustružení a broušení. Nahrazuje tak broušení tvrdých materiálů nebo řezání diamantovým kotoučem. Proto našlo toto obrábění s přidaným energetickým zdrojem využití při řezání nebo broušení kalených materiálů nebo keramiky.

Paprsek laseru neslouží při použití této metody přímo pro oddělování materiálu, ale slouží ke změně mechanických vlastností materiálu (Při tomto způsobu slouží laserový paprsek k ohřátí povrchu materiálu obrobku). Jeho následné obrábění se tedy nadále uskutečňuje již ve stavu, kdy je materiál méně tvrdý;

- laserové obrábění;

Používá se pro operace vrtání, řezání nebo například tvarového obrábění.

2.3.2 Laserové obrábění

2.3.2.1 Vrtání pomocí laseru

Při vytváření hlubokých otvorů laserem, zůstává natavený materiál v otvoru, kde se hromadí a rozstříkuje po stěnách. Tlak v otvoru tedy roste (až 10^4 MPa), proto nakonec začne proudit ven z otvoru rychlostí ultrazvuku. [11]

Při vrtání pomocí laseru se využívá tzv. ablace – jde o odstranění materiálu z řezu aniž by došlo k jeho odpaření – materiál je tak odstraňován ze vznikajícího otvoru v kapalném stavu a jen malá část materiálu ze středu paprsku vypařením. [11]

Platí, že čím delší je vrtaná díra, tím více se odchyluje tvar díry od geometrie. Změna průměru otvoru je v rozmezí 5 – 20%. [11, 3]

Délka vrtané díry může mít délku až 50mm. Tvar vrtného otvoru je typický svým vstupním kuželem. Díry lze vrtat kruhové i tvarové. [11, 3]

Použití: vrtání kovů (př. vstřikovací trysky, proudové motory), plastů, dřeva, papíru, keramiky, aj. [3]

Lasery: CO₂, Nd-YAG.

2.3.2.2 Mikroobrábění

Technologie obrábění pomocí laserového paprsku nahrazuje obrábění tvrdých materiálů pomocí ultrazvuku nebo elektrojiskrového obrábění. Má oproti zmíněným metodám velkou výhodu – větší rychlost obrábění a tvorbu rozmanitých tvarů bez výměny nástroje [11] – to vede ke zkracování výrobních časů.

Využití: obrábění elektrických součástek, značení a popis laserem, gravitování – mikrofrézování. [11, 5, 32]

Lasery – především excimerové lasery, ale také CO₂ nebo Nd-YAG [11, 5]

2.3.2.3 Soustružení

Největší uplatnění nachází při obrábění tvrdých materiálů, které jsou těžkoobrobitelné – keramika, kalené oceli.

Pro soustružení obrobků nekonvenčním způsobem se používají následující metody:

- odtavování materiálu – ohřívání povrchových vrstev obrobku. Materiál se otáčí proti směru působení paprsku, tím se obrobek intenzivně taví a asistentním plynem odfukuje, [5]
- odřezávání dvěma paprsky laseru – paprsky jsou různoběžné, takže se v určitém místě protínají, tím dojde ke spojení dvou řezných spár a oddělení části materiálu ve tvaru mezikružlí. [11, 5]

Lasery: CO₂, Nd-YAG

2.3.2.4 Dokončovací metody

Působením paprsku na povrch rotujícího obrobku dochází ke zmenšování všech mikronerovností - ke snížení parametru drsnosti: největší výšky profilu povrchu Rz. [11]

Výhody metody [11]: jeden druh nástroje bez opotřebení,
Nevýhody[11]: energeticky náročný proces.

2.3.2.5 Využití průmyslových laserů při řezání

Z principu funkce laseru vysvětleného v kapitole 1.4 je zřejmé, že laser koncentruje velké množství energie do malé plochy. Tím se materiál nataví, případně i odpaří. Toho se užívá při technologiích dělení materiálu, při obrábění, tepelném zpracování, svařování, nebo tvorbě speciálních povrchových vrstev. [11, 4]

Pomocí laseru můžeme řezat velmi malé otvory nebo velmi tvrdé materiály vysokou rychlostí a při dobré kvalitě řezu. [3, 4]

3 DĚLENÍ MATERIÁLU LASEREM

3.1 Účinek paprsku na materiál

Při dopadu laserového paprsku na materiál dochází k vzájemné interakci – část paprsku se odrazí, část pohltí materiál a část materiálem projde. Průchodem paprsku se materiál zahřívá, materiál se natavuje a poté odpařuje.

Proto nejdůležitějšími vlastnostmi daného materiálu pro použití laserového řezání jsou [11]:

- odrazivost (reflektivita) povrchu,
- absorpce (pohlčení) záření,
- tepelná vodivost.

Tab. 2.1 Odrazivost kovů [11]

Kov	Reflektivita [%]	
	vlnová délka [μm]	
	0,9 - 1,1	9 - 11
zlato	94,7	97,7
stříbro	96,4	99
hliník	73,3	96,9
měď	90,1	98,9
zinek	49	98,1
ocel (1%C)	63,1	93 - 96
uhlík	26,8	59

3.2 Proces dělení

Při dělení materiálu laserem vznikají pouze minimální deformace materiálu, protože nedochází k mechanickému dělení materiálu. Dělení materiálu laserem je mnohem snazší než mechanickým způsobem, proto lze dělit i materiály křehké nebo deformovatelné i malou silou. Lze řezat materiály složitých tvarů – tvarově náročné dílce. Jediným omezením jsou rozměry tvarů, které musí odpovídat přibližně tloušťce řezaného materiálu. [4]

Řezání materiálů laserem je vhodné pro malosériovou a sériovou výrobu.

3.2.1 Rozdělení dle technologie

Dle [11, 13] lze rozdělit z technologického hlediska řezání laserem na dvě metody:

- řezání materiálu – řezání ocelových plechů,

- vytvoření drážky na povrchu materiálu a následný kontrolovaný lom – dělení křehkých materiálů – keramika, sklo.
Tato metoda využívá tepelných pnutí, je ještě ekonomičtější metodou než je výše zmíněná metoda.

Způsoby dělení materiálu pomocí kontrolovaného lomu [13] :

- o materiál se dělí mechanickým rozlomením podél vytvořené drážky – základním parametrem je hloubka řezu vytvořená laserem, tak aby se materiál následně mechanicky rozlomil.
Na kvalitu řezu nemá vliv šířka řezu. Ta je rovna přibližně průměru laserového paprsku,
- o vyvoláním tepelných pnutí. Paprskem se ohřívají pouze vnější vrstvy materiálu, takže v povrchové vrstvě materiálu vznikají tlaková napětí. Střed materiálu se naopak neohřívá tak intenzivně jako povrch, takže brání rozpínání materiálu. Vniká zde tahové namáhání. Tlaková napětí jsou mnohem větší než tahová. Když toto pnutí přesáhne mez pevnosti materiálu R_m , vnikne trhlina v místě ohřevu.



Obr. 3.1 Pohled do pracovního prostoru laserového řezacího pracoviště [5]

3.2.2 Technické plyny [4]

Použití technických plynů u laserových zařízení se dělí do dvou oblastí:

- jako pracovní náplň - pouze u plynových laserů,
- jako asistenční plyn či ochranná atmosféra.

Ve strojírenské výrobě jsou aplikovány především lasery s plynovým aktivním prostředím.

Výhody plyných aktivních prostředí jsou v dobrém odvodu tepla.

Plynná atmosféra plní jak ochrannou funkci při zpracování materiálů před okolní atmosférou [4], dále pak chrání optiku před částicemi opracovávaného materiálu. [11]

Stejně tak slouží pomocný plyn i pro podporu oxidační reakce (na podporu spalování) při tepelném dělení ocelových materiálů. [4]

Při svařování a vytváření povrchových vrstev se užívají převážně inertní plyny argon, helium, a dusík (uváděny jako asistenční plyny). [4, 31]

3.2.3 Lasery vhodné pro řezání

Název mají dle pracovní náplně (dle aktivního prostředí).

3.2.3.1 CO₂ lasery

Nejčastěji používanými lasery v oblasti řezání materiálu jsou kontinuální CO₂ (oxid uhličitý) lasery o středním výkonu 15kW. [3,4]

U těchto laserů je obtížnější získání kontinuálního provozu – je zapotřebí odvádět velké množství tepla, stejně tak je zapotřebí dostatečně silný zdroj energie pro vybuzení světla. [13]

Energie potřebné k excitaci se vytváří pomocí elektrod, na které se přivádí vysoké napětí z generátoru vysokého napětí. [11]

Aktivní prostředí CO₂ laseru je tvořeno směsí plynu He (80%), N₂ (10%) a CO₂ (3-10%). [4, 29]

CO₂ laser využívá pro vznik stimulované emise záření energetické přechody nastávající mezi molekulami oxidu uhličitého (CO₂) a dusíku N₂. [11]

Helium má dobrou tepelnou vodivost, hlavním jeho účelem je odvod tepla (dusík přijímá od helia srážkovou energii a předává ji molekule oxidu uhličitého). Principem CO₂ laseru je tedy vibrace molekul CO₂ a následným vyzářením fotonů s vlnovou délkou 10,6 um. [4]

Jelikož se tyto plyny při průchodu rezonátorem zahřívají a tím ztrácí svou schopnost vytvářet laserové záření, musí se plyny obměňovat. [15]

Laserové plyny musí splňovat podmínky minimální čistoty, jelikož jakákoli nečistota má nepříznivý dopad na životnost, přesnost a výkon daného laseru. [28]

Některé CO₂ lasery mají zabudované směšovací (regulační) stanice a potřebují tak jen lahve s jednotlivými plyny. Jiné lasery naopak potřebují směs plynů pracovního již namíchané v jedné tlakové lahvi. [4, 30]

Plyn se během procesu částečně rozkládá na oxid uhelnatý (CO) a kyslík (O₂). Tím se znehodnocuje a snižuje se tak výkon laseru. Použitý plyn může ale být opět regenerován a být znovu použit v procesu. [11]

Teplo vzniklé při procesu je odváděné chladícím médiem (nejčastěji je používána voda) do chladícího agregátu. [11]

Dle [11, 27] lze CO₂ lasery rozdělit podle toku plynu vzhledem k optické ose laseru:

- axiální – proudění plynu podél optické osy,
 - nejpoužívanější,
 - výkon 60 – 70 W na 1m délky laserové trubice,
- transverzální - proudění plynu kolmo na směr optické osy,
 - dosahují vyšších výkonu co se týče poměru výkonu k jednotce objemu dutiny.

3.2.3.2 Nd-YAG Laser

Tento laser vytváří pevný krystal Y₃Al₅O₁₂ (ytrium, hliník, kyslík), který obsahuje asi 1% ND³⁺ (neodýmu). Ionty neodýmu vytváří v laseru aktivní prostředí. [11]

Patří mezi nejvíce používaný laser ze skupiny pevnolátkových laserů. Pracuje v pulzním i kontinuálním režimu. Vhodný pro vrtání, řezání, svařování, popisování.[7]

Musí se však nutně chladit (stejně jako rubínový laser), protože se při velkých výkonech značně zahřívá. [9]

Tyto pevnolátkové lasery se umísťují do odrazivé dutiny s kruhovým nebo eliptickým průřezem. Do jednoho ohniska se umístí krystal, do druhého budící lampa. Odrazivost dutiny musí být co největší, aby vznikly co nejmenší ztráty. [9]

Proto zdrojem buzení je světelný impulz z obloukové xenonové nebo kryptonové lampy a odrazový rezonátor má válcovitý nebo eliptický tvar, který je vyrobený z kovů s vysokou tepelnou vodivostí (Cu – měď, W – wolfram, a další). Povrch rezonátoru je vyleštěn, dále je pokryt vrstvou kovu s vysokým koeficientem odrazivosti (98-99%). Pro tyto účely se používá zlato nebo stříbro. [11]

Výkon laseru je tedy dán kvalitou odrazivé dutiny a zahříváním krystalu. [9]

3.2.3.3 Excimerové lasery [11]

Využití excimerových laserů ve strojírenství nabylo koncem 20. století velkého rozmachu a to hlavně pro zpracování keramických a kompozitních materiálů. Další použití našel v oblasti mikroobrábění tenkých kovových profilů a značení nebo odstraňování přebytečného materiálu na plošných spojkách.

Vytváří záření v oblasti ultrafialového a částečně až rentgenového světla.

Excimerový laser pracuje v pulzním režimu. Je to plynový laser s nejkratšími možnými impulsy elektromagnetického záření. Aktivní látku vytváří fluorid kryptonu.

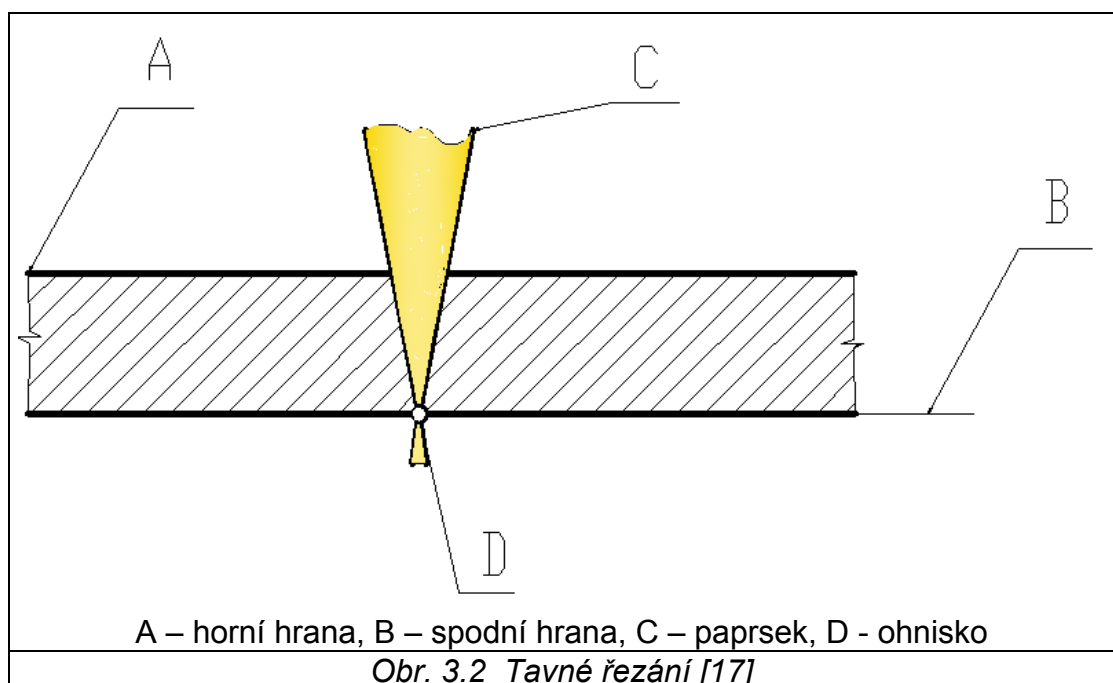
3.2.4 Způsoby řezání

Při technologiích řezání laserem se do hlavičky laseru vhání pod tlakem plyn, ten plní několik funkcí [4]:

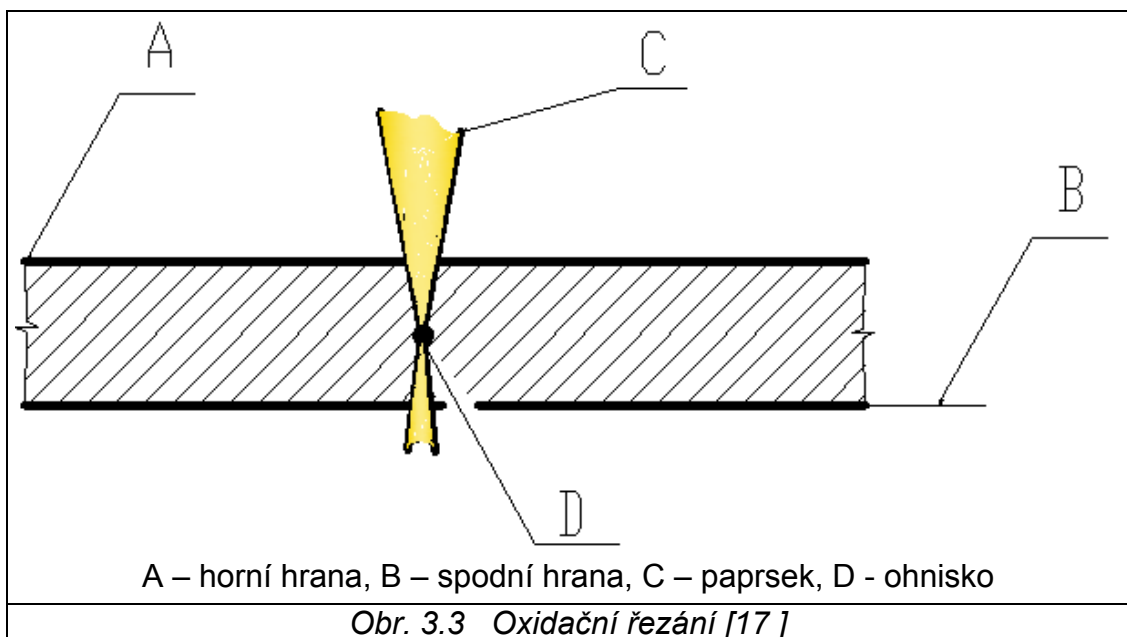
- urychluje proces - buď zvýšeným spalováním,
- nebo vytlačuje taveninu z řezu,
- je převážně určen pro ochlazování místa řezu.

Podle toho rozdělujeme základní metody dělení laserem na [4, 5, 23]:

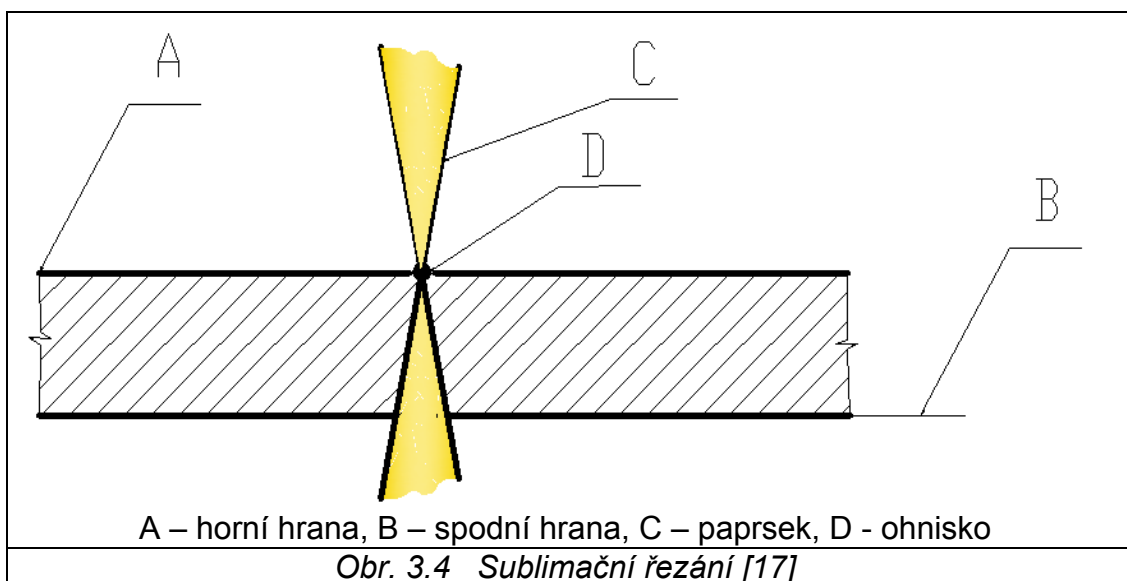
- **tavné řezání** - dělený materiál se v místě řezu nataví. Tato tavenina je poté proudem inertního (asistentního) plynu oddělována (příp.odfukována) od základního materiálu. Tímto způsobem jsou řezány nekovové materiály, jako jsou keramika, plasty, dřevo, textilní materiály, papír a sklo. Tento způsob řezání využívá jen malých rychlostí posuvu řezné hlavy,

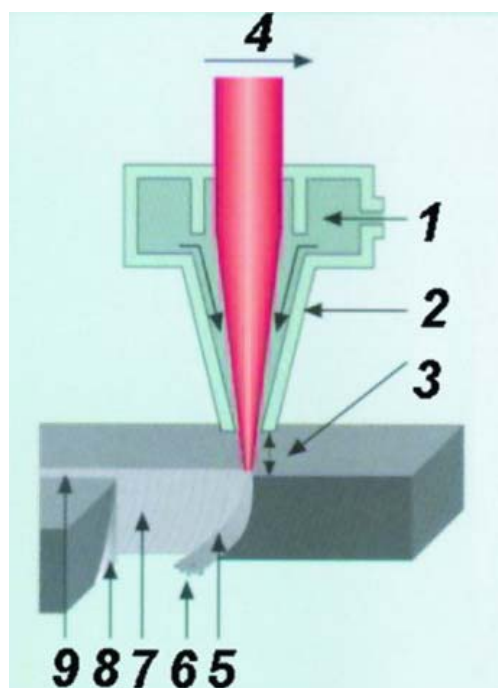


- **oxidační řezání** (= pálení) – používá kyslíku jako řezného plynu. Paprsek laseru ohřeje povrch kovu na zápalnou teplotu, takže přivedením kyslíku (reaktivního) plynu ohřátý materiál shoří v exotermické reakci, ta má za následek další ohřátí materiálu. Vzniklá struska je z místa řezu odstraňována asistentním plynem. Oxidačním řezáním dosáhneme vyšších rychlostí řezu. Tento řez má ale horší kvalitu – vyšší drsnost a větší tepelně ovlivněnou zónu,



- **sublimační řezání** - materiál je v místě řezu odpařován v důsledku vysoké intenzity záření laseru v jedné bodě (místě řezu).





- Legenda:
- 1) asistentní plyn
 - 2) řezací tryska
 - 3) pracovní vzdálenost trysky
 - 4) rychlost
 - 5) tavenina
 - 6) odtavený materiál
 - 7) stopy po paprsku laseru
 - 8) tepelně ovlivněná oblast
 - 9) šířka řezu

Obr. 3.5 Princip metody řezání laserem [5, 26]

3.2.5 Možnosti řezání laserem z hlediska materiálu [11]

3.2.5.1 Kovové materiály

Nejvýhodnější je použití CO₂ laseru co se týče hospodárnosti. Nejlepší jsou pro řezání plechů o tloušťce 7mm. Jednotlivé řezné podmínky jsou pro odlišné pro daný typ oceli (nízkolegovaná, legovaná, korozivzdorná, měkká).

Výhodou řezání nízkolegovaných ocelí je tvorba lehce odstranitelných oxidů kovů.

Důležitý je také stav povrchu, který ovlivňuje řezný proces – jde o zbytky maziv na povrchu nebo naoxidovaná vrstva (ta je velmi tvrdá, a výrazně ovlivňuje kvalitu řezu kvůli ztuhnutým kapkám materiálu, které vytváří. Další omezující podmínky při řezání jsou u povrchově upravených plechů. Dochází zde totiž k poškození ochranné vrstvy buď odpařením povlaku u pozinkovaných plechů, nebo poškozením vazeb mezi materiálem a povlakem u barvených plechů. Toto poškození nastává z důvodu odvodu tepla z řezu.

U plechů, které mají tryskaný povrch se kvalita řezu také zhoršuje.

Řezání korozivzdorných ocelí má také svá úskalí. Rychlost řezání se nárůdíl od řezání uhlíkové ocele snižuje. Závisí hlavně na obsahu chromu v materiálu, který vytváří neoxidovanou vrstvu, bránící řezání. Maximální řezatelná tloušťka korozivzdorného materiálu se tak snižuje až na polovinu tloušťky materiálu z měkké oceli.

3.2.5.2 Neželezné kovy (titan, hliník, měď, nikl)

Jsou pro řezání CO₂ laserem obtížnější. Řezání není tak výkonné jako řezání uhlíkové oceli, protože tyto materiály jsou silně oxidativní (při řezu vznikají otřepy), jejich povrch má vyšší reflektivitu a vysoká je i tepelná vodivost těchto kovů. Řezná rychlost neželezných kovů se tak oproti řezání oceli redukuje. Běžné je tak použití ochranné atmosféry – obvykle se používá argon (inertní plyn).

Jedinou výjimku co se týče výkonnosti řezání tvoří titan. Chová se obdobně jako ocel, kromě toho, že vytváří silnou oxidativní vrstvu – musí se řezat v ochranné atmosféře a s vysokým tlakem plynu (zaručuje kvalitní řez). Jako kontrola oxidické vrstvy stačí porovnání barvy kovu v místě řezu (tato vrstva je zbarvena domodra nebo dožluta).

3.2.5.3 Nekovové materiály (kompozity, keramika, plasty)

Možnosti:

- natavení materiálu a následný stříh – rychlá metoda, používá se pro keramiku a termoplasty,
- natavení a následné odpaření materiálu – vzniká kvalitní řez, použití např. pro plexisklo,
- chemická degradace – metoda založena na různorodém složení materiálu a chemických změn fází materiálu - kvalitní řez, pokrytý vrstvou uhlíku. Použití pro řezání kompozitů, dřeva, PVC, aj.

Výhodné je zde především použití Nd-YAG laseru a excimerového laseru (u těchto laserů nedochází k tak velké tepelně ovlivněné oblasti jako u CO₂ laseru).

3.3 Základní charakteristiky procesu řezání laserem [5]

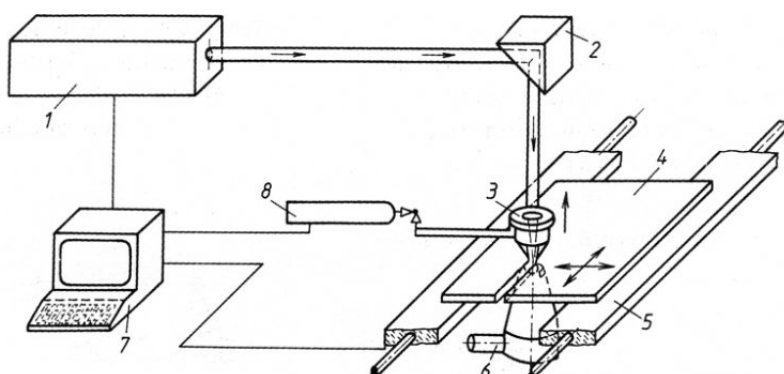
- rychlost řezání - závisí na způsobu řezání, výstupním výkonu paprsku laseru, požadované kvalitě řezu, tloušťce a druhu řezaného materiálu,
- kvalita řezu - hodnotí se podle jakosti řezané plochy (dosahuje se Ra 3,6 až 12 mm) a tloušťky tepelně ovlivněné oblasti (bývá 0,05 až 0,2 mm),
- šířka řezné spáry - je dána druhem laseru, druhem a tloušťkou řezaného materiálu (bývá 0,02 až 0,2 mm).

Výhody řezání laserem:

- malá šířka řezu,
- malá velikost tepelně ovlivněné oblasti,
- žádné opotřebení nástroje,
- čisté řezy,
- možnost řezání složitých tvarů,
- hospodárnost i při malých výrobních sériích.

CO₂ laserem se středním výkonem do 15 kW je možné řezat konstrukční ocele do tloušťky 20 mm, korozivzdorné ocele do tloušťky 10 mm a slitiny hliníku do tloušťky 5 mm.

Pro přesnější řezy s menší šířkou řezné spáry se používají Nd:YAG lasery o výkonu 100 až 1 000 W, kterými lze řezat konstrukční ocele do tloušťky 6 mm, korozivzdorné ocele do tloušťky 3 mm a slitiny hliníku do tloušťky 2 mm. [5]



1 - laser, 2 - zrcadlo, 3 - pracovní řezací hlava, 4 - obrobek,
5 - pracovní stůl stroje, 6 - odsávání zplodin, 7 - CNC řídicí systém

Obr. 3.7 Schéma zařízení pro řezání laserem [5]

4 VÝROBA SOUČÁSTÍ MANIPULAČNÍ TECHNIKY POMOCÍ LASERU – MANEX & Co., a. s.

4.1 Stručný popis výroby a výrobků

Firma Manex & Co, a.s. se zabývá vývojem projekcí a výrobou manipulační techniky a technologického zařízení pro manipulaci s polotovary, hotovými výrobky a obaly.[16] Převážná část těchto zařízení je projektována pro potravinářský průmysl.

Výrobky[16]:

- suché části plnicích linek v potravinářském průmyslu - doprava a paletizační systémy:
 - o linky pro plnění do PET,
 - o linky pro plnění do skleněných,
 - o linky pro plnění do sudů,
- paletizéry/depaletizéry – kompaktní zařízení určené k ukládání/vykládání zboží na paletu,
- dopravníky produktů:
 - o válečkové,
 - o destičkové,
 - o modulární,
 - o pásové,
 - o vzduchové,
 - o řetězové,
- elevátory.

Z uvedených výrobků je jasné, že každá linka představuje zvláštní projekt, tedy nové řešení odpovídající představám zákazníků a také řešení odpovídající dané výrobní hale.

Při výrobě manipulační techniky se jedná o kusovou, někdy malosériovou výrobu. Z tohoto důvodu nelze ve výrobě uplatnit proudovou výrobu (linku).

Stroje zařazené do výrobního systému:

Styl sériové výroby odpovídá použitým výrobním strojům – jsou použity univerzální stroje.

Uspořádání strojů je technologické.

Při výrobě součástí manipulační techniky patří mezi nejvíce užívané polotovary:

- tabule plechu - výrobu plechových bočnic strojů, krytů a jiných částí,
- tyčový materiál – převážně na výrobu hřídelovitých součástí.

Právě pro kusovou výrobu pro obrábění plechů je vhodné užití laserového pálcího zařízení – CNC zařízení. Lze pružně měnit výrobu, pálit složité tvary.

Proto firma Manex zakoupila laser Bystronic, Bysprint 3015, který patří mezi nejpoužívanější stroje ve výrobě.

4.2 Laser BYSTRONIC

4.2.1 Základní údaje [17]

Laser BYSTRONIC, typ: BYSPRINT 2 3015

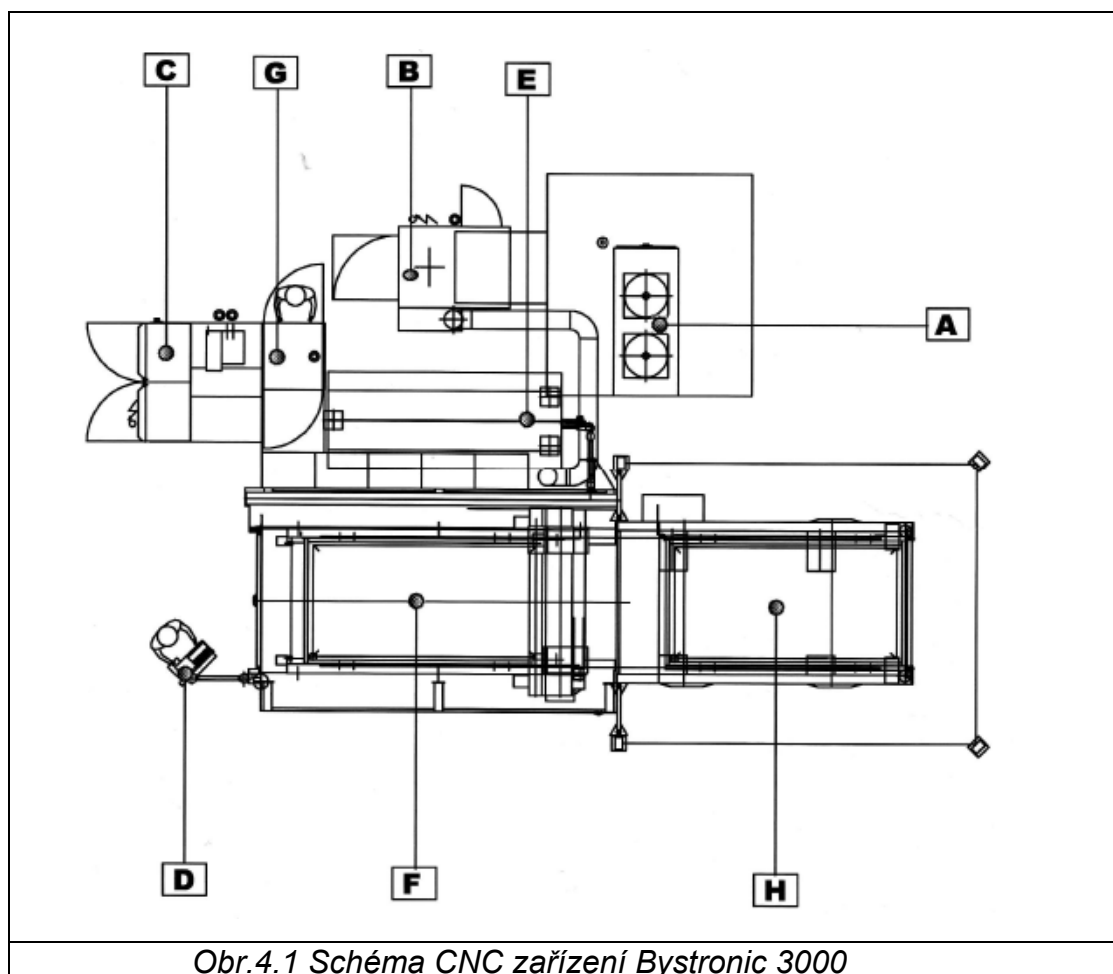
Tab. 4.1 Základní parametry stroje Bystronic, Bysprint 3015

Základní parametry	
Maximální výkon rezonátoru	3000W
Laserové médium	CO ₂
Výstupní vlnová délka	10600nm
Průměr paprsku	12mm
Polarizace	kruhová
Rozměr rezonátoru	345x80x170cm
Rozměry MCS ovládání rezonátoru	85x90x200cm
Rozměry chladicí jednotky	200x88x195cm
Hmotnost rezonátoru	1,85kg
Hmotnost skříně ovládání rezonátoru	350kg
Hmotnost chladicí jednotky (bez chladicí kapaliny)	870kg

Tab. 4.2 Požadovaná čistota použitých plynů

Laserové plyny	
Helium He	čistota min. 99,996%
Dusík N ₂	čistota min. 99,999%
Oxid uhličitý CO ₂	čistota min. 99,995%
Vstupní tlak	5 bar

4.2.2 Konstrukce laseru [12,17]



Obr.4.1 Schéma CNC zařízení Bystronic 3000

Popis částí CNC zařízení (obr. 4.1):

A. Chladicí jednotka

Redukuje teplo vznikající ve směsi laserových plynů pomocí tepelného výměníku, kde se vzniklé teplo předává do vodního oběhu jednotky.

Chladič vody laser KLH Kältetechnik GmbH, typ: SC 31.S2L.HT – 01 – BYS / 02, rok výr: 2002

B. Filtrovací jednotka a zásobovací jednotka

filtr laser DUSTCOLLECTOR ENTSTAUBER,fi.DONALDSON DUST , COLLECTION GROUP, Typ: DF + 6 SPK TRP

Zásobovací jednotka – zajišťuje zásobování stroje stlačeným vzduchem, přičemž je tento vzduch nejdříve odvlhčen absorpčním sušičem. Je složen ze dvou částí, v jedné části se vysouší stlačený vzduch, zatímco druhá část sušiče se regeneruje.

- C. Skříň ovládání** - dvě skříň ovládání. CNC skříň (Computer Numerical Control) – slouží pro převod řezných plánů spolu s parametry procesu na pohyb jednotlivých os. Samostatně upravuje rychlost pohybů a výkon rezonátoru s ohledem na tvar páleného dílce.
STL kříž – (Control Table Laser) – obsahuje prvky pro dodávku elektrické energie, ovladač výměnného stolu, a kontroluje bezpečnostní prvky stroje.
- D. Terminál obsluhy** – Obsluha stroje je zajištěna přes panel PC (obsluhován přes klávesnici, myš, nebo dotykový monitor) nebo lze použít ruční ovladač (používá se pouze pro základní operace – seřizování, nastavování, testovací řezy).
- E. Rezonátor** – je spojen s laserovým strojem pomocí kabelového mostu. Ve spodní části rezonátoru se nachází nízkovibrační turbína, vakuová pumpa a systém přípravy plynu.
Aktivní médium: směs CO_2 , N_2 , He. Transport plynu je zajištěn pomocí zmíněné turbíny. Proudí do rezonátoru v osovému směru. Turbína je chlazená vodou.
- F. Laserový stroj** – samotný stroj se skládá z řezacího nosníku, který zajišťuje pohyb v ose Y, na tomto nosníku se pohybuje řezací vozík, tím je zajištěn pohyb v ose X. Vozík je osazen osou Z, která pohybuje řezací hlavou ve vertikálním směru. Laserový paprsek je tak veden přes zmíněné části pomocí systému zrcadel a vychylovacího zrcadla až do hlavy. Do té je také vháněn procesní plyn, ten chrání řeznou hlavu proti poškození rozstříknutým materiálem.
- G. Skříň MCS** – mikropočesorové ovládání rezonátoru, dodávka elektrické energie a jednotka pro směs laserových plynů.
- H. Výměnný stůl** – stroj obsahuje dva výměnné stoly s vlastními pohony – tím je umožněno vyjmutí opracovaných dílů a vsazení dalšího plechu bez přerušení pracovního programu stroje. Každý výměnný stůl má je vybaven podpěrnými rošty. Během řezání dochází k jejich postupnému znehodnocování. Nosné rošty lze však na laseru řezat a tedy obměňovat.

Dalším zařízením nutným pro provoz stroje je kompresor. Ve firmě Manex, a.s. jde o kompresor laser ALUP KOMPRESOR, typ: GE 15, rok výr.: 2002

4.3 Rozbor součástkové základny z hlediska použitých materiálů [12, 17]

4.3.1 Řezání konstrukční ocele

4.3.1.1 Řezání konstrukční ocele s kyslíkem (O_2)

Lze řezat v dobré kvalitě. Používá se v provozu CW. Vzniká lehce zoxidovaná řezná hrana.

Možno použít také vysokotlaké řezání s dusíkem (N_2). Řezná hrana je při použití dusíku bez oxidů.

Doporučené režimy pro speciální řezání:

- otvory s průměrem menším než je tloušťka desky nebo obtížné otvory se musí řezat s kyslíkem v pulzním režimu. Tím se zabrání upalování tenkých částí obrobku,
- pokud možno řezat pouze uklidněnou ocel,
- otryskaný povrch způsobuje horší kvalitu řezu,
- čím vyšší je obsah uhlíku v oceli, tím více je řezná hrana zakalená a ostré rohy se tím více upalují.

Při obrábění desek velkých tloušťek se při zapichování materiál silně zahřívá, proto je doporučen používat zápich CPP (řízené pulzní zapichování).

4.3.2.2 Řezání konstrukční ocele s dusíkem (N_2)

- důvody použití dusíku:
 - o řezná hrana bez oxidace,
 - o možnost řezat vysoce legované oceli s kvalitním místem řezu,
 - o rychlejší řezání materiálů do tl. 2mm,
 - o chladicí účinek dusíku,
- nevýhody: vyšší spotřeba plynu jak při řezání s dusíkem.

Využití pulzního řezání:

Při metodě pulzního řezání se laser zapíná a vypíná v určitých intervalech. Takto lze řezat i malé otvory a složité obrysy, protože do materiálu se dostává méně tepla. Při pulzním režimu je vypnuta modulace.

4.3.2.3 Použité konstrukční ocele při pálení na laseru ve fy. Manex & Co., a. s. [34]

A. Nelegovaná ocel obvyklých jakostí ČSN 41 1373

Ocel 11 373 (vhodná ke svařování pro konstrukce)

Tab. 4.3 Chemické složení oceli 11 373

Chemické složení [hm. %]			
C	P	S	N
max 0,17	max. 0,045	max 0,045	max 0,007

Svařitelnost:

Dle ČSN 05 1309 vhodná ke svařování

Použití:

Součásti konstrukcí a strojů menších tloušťek, i tavné svařování, namáhané staticky i mírně dynamicky. Vtokové objekty vodních turbín, výtoky, hradidlové tabule, stavidla, méně namáhaná svařovaná potrubí a odbočnice, jezové konstrukce. Dna plochá, klenutá a lemovaná vysokotlaká. Součásti svařované kovářsky.

B. Nelegovaná konstrukční ocel ČSN 41 1353

Ocel 11 353

Tab. 4.4 Chemické složení oceli 11 373

Chemické složení [hm. %]			
C	P	S	P+S
max 0,18	max. 0,050	max 0,050	max 0,090

Svařitelnost:

Při tloušťce

- do 25mm zaručená,
- nad 25mm zaručená podmíněná (doporučen předehřev 150 – 200°C).

Použití:

Jednouúčelová ocel pro výrobu bezešvých trubek. Vhodná na konstrukce staticky namáhaných součástí a na potrubí. Nelze použít na nosné části konstrukcí.

C. Nelegovaná konstrukční ocel jemnozrnná ČSN 41 1523

Ocel 11 523 (ocel vhodná ke svařování)

Tab. 4.5 Chemické složení oceli 11 523

Chemické složení [hm.%]					
C	Mn	Si	P	S	N
max 0,20	max. 1,60	max 0,55	max. 0,040	max. 0,040	max. 0,009

Svařitelnost:

Podle ČSN 05 1309 vhodná ke svařování

Použití:

Mostní a jiné svařované konstrukce, ohýbané profily, svařované konstrukce z dutých profilů a součásti strojů, automobilů, motocyklů a jízdních kol. Součásti tepelných energických zařízení a součásti tlakových nádob vyrobených z tyčí.

4.3.1 Řezání bez oxidů do ocele odolné proti korozi a kyselinám [12, 17]

Při řezání do korozivzdorné oceli se musí dodržovat zásady:

- řezat s dusíkem,
- možnost použití vysokotlakého řezání s dusíkem – docílí se stejné nebo i vyšší rychlosti jako je při řezání s kyslíkem,
- dodržovat větší vzdálenost trysky pro zapichování než při řezání (chráníme tak čochku proti ostříku).

Při řezání ocele odolné proti korozi a kyselinám se musí používat ukládací rošty ze stejného materiálu – vyvarujeme se tak následné oxidaci materiálu v místě dotyku obrobku s roštem (důvod: v místě dotyku se často svařují roztavené kapičky strusky s dílcem).

Při řezání plechů s ochrannou fólií, leží ochranná folie vždy nahoře (folie se používá u plechů do tl. 3mm). Jako řezný plyn se používá dusík (N₂). Pokud ochranná folie drží špatně musí se odstranit ručně. Pokud ale drží průměrně, lze použít procesu odpaření folie po celém obrysu dílce.

4.3.2.1 Použité korozivzdorné ocele při pálení na laseru ve firmě Manex & Co., a. s. [34]

A. Korozivzdorná austenitická ocel ČSN 41 7240

Ocel 17 240

Tab. 4.6 Chemické složení oceli 17 240

Chemické složení [hm. %]						
C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
max.0,07	max.2,0	max.1,0	17,0 - 20, 0	9,0 - 11,5	max.0,045	max 0,030

Odolnost proti degradačním procesům:

Odolnost proti korozi:

- odolnost proti plošné korozi – odolává kyselině dusičné, slabám roztokům organických kyselin; odolnost proti korozi zle zvýšit leštěním, tvářením zastudena se korozivzdornost mírně snižuje;
- odolnost proti mezikrystalové korozi – ve srovnání s ocelí 17 241 odolává lépe, při aplikaci svaru v silném korozním prostředí, nutno přežíhat celou součást s následujícím ochlazením na vzduchu,
- odolnost proti žáru.

Tab. 4.7 Odolnost proti žáru oceli 17 240

Odolnost oceli	
v oxidačním sirném prostředí (obsahující SO ₂)	do 750°C
v redukčním sirném prostředí (obsahujícím H ₂ S)	do 600°C
v páře	do 750°C
ve směsných plynech	do 550°C
na vzduchu	do 850°C

Svařitelnost:

Podle ČSN 05 1309 - zaručená

Použití:

Austenitická, svařitelná, nestabilizovaná, korozivzdorná ocel vhodná pro chemické zařízení včetně tlakových nádob. Vhodná pro prostředí oxidační povahy pro silné anorganické kyseliny jen při velmi nízkých koncentracích a v oblasti normálních teplot. Lze ji též použít pro prostředí vyžadující vysokou čistotu produktu (farmaceutický a potravinářský průmysl).

B. Korozivzdorná austenitická Cr - Ni - Mo ocel ČSN 41 7349

Ocel 17 349

Tab. 4.8 Chemické složení oceli 17 349

Chemické složení [hm. %]				
C	Mn	Si	Cr	Ni
max. 0,03	max. 2,0	max. 1,0	16,5 - 18,5	11,0 - 14,0
Mo	P	S		
2,0 - 2,5	max.0,045	max.0,030		

Odolnost proti degradačním procesům

- odolnost proti plošné korozi.
Odolává po rozpouštěcím žhání řadě agresivních činidel, zejména kyselině sírové a fosforečné a je zcela srovnatelná s ocelí 17 346, je však méně náchylná k nožové korozi;
- odolnost proti mezikrystalové korozi.
Zaručená, při delším setrvání v oblasti kritických teplot nelze v silně agresivních prostředích mezikrystalové napadení vyloučit nad teplotou 450°C.

Svařitelnost:

Podle ČSN 05 1309 - zaručená

Použití:

Pro stavbu zařízení tlakových nádob a aparátů v chemickém, farmaceutickém, textilním a potravinářském průmyslu, kde se vyžaduje zvýšená odolnost proti neoxidujícím kyselinám nebo zvýšená čistota produktu, zejména na svařované díly, které mají odolávat mezikrystalové korozi a nelze je po svařování žíhat. Vhodné na součásti leštěné na vysoký lesk.

4.3.3 Bezoxidové řezání hliníkových slitin [12, 17]

Nečastěji řezanou slitinou hliníku je slitina AlMg3 a to z důvodu kvalitního následného ohýbání dílců.

Jako řezný plyn se používá dusík (N₂). Při zapichování tlustších desek se využívá i kyslíku.

Čím je slitina hliníku měkčí a čistší, tím je laserové řezání obtížnější.

Řezání hliníku vede ke zkrácení životnosti optiky – jde o silně odrazivý materiál a paprsek je odrážen zpět.

4.3.3.1 Hliníkové slitiny pálené na laseru ve fy. Manex, a. s. [34]

Slitina hliníku tvářená $AlMg_3$ ČSN 42 4413

Tab. 4.9 Chem. složení $AlMg_3$

Chemické složení [hm. %]					
Mg	Mn	Si	Fe	Ti	Zn
2,5 - 4,0	0,05 - 0,4	max. 0,5	max. 0,4	max. 0,2	max. 0,2
Cu	Cr	Fe+Si	ostatní jednotl.	celkem	Al
max. 0,1	max. 0,05	max. 0,6	max. 0,1	max. 1,1	zbytek

Odolnost proti degradačním procesům - odolnost proti korozi:

- velmi dobrá, odolnost proti mořské vodě a slabě alkalickým roztokům .

Technologické údaje:

- svařitelnost: velmi dobrá při svařování plamenem a všemi běžnými technologiemi,
- tvařitelnost – velmi dobrá při lisování za tepla.

4.3.4 Další materiály [12, 17]

- titan – výhodné je použití argonu jako řezného plynu – dostane se čistá hrana bez otřepu.
- měď, mosaz – problém vysoká tepelná vodivost a odrazivost těchto materiálů. Mosaz řezeme dusíkem, do tl. 6mm. Měď je řezatelná do tloušťky 3mm, pomocí kyslíku.

4.3.5 Materiály nevhodné pro řezání [12, 17]

- stříbro – vysoká odrazivost,
- dřevo, kůže, papír – vysoká prašnost, možnost vzniku požáru,
- keramika – dojde k roztrhnutí materiálu.

4.4 Rozbor součástkové základny z hlediska geometrie a tvaru vyráběných součástí [12, 17]

Možnosti pálení plechů na laseru Bystronic, Bysprint 3015 jsou závislé na jejich tloušťce a na typu páleného materiálu (konstrukční ocel, nerez ocel, hliník). Existují jistá doporučení jaké materiály pálit a jaké naopak nepálit, viz. tab. 4.8

Tab. 4.10 Maximální řezné tloušťky tabulí

Laserový zdroj 3 000 W	
Materiál	Tloušťka
Konstrukční ocel	20 mm
Ocel odolná proti kyselinám a korozi	12 mm
Hliník	8 mm

Stejně tak, jsou závislé jednotlivé tvary a obrysy pálené laserem. Pokud jde o velikost díry, kterou je možné vyrobít na laseru, je také závislá na tloušťce materiálu (tab. 4.9)

Tab. 4.11 Nejmenší řezatelné otvory

Nejmenší řezatelné otvory	
Maximální řezná tloušťka tabule	1 x tloušťka tabule
Ostatní tloušťky tabulí	0,5 x tloušťka tabule

Menší průměry otvorů než jsou doporučené otvory v tab. 4.9 vedou ke snížení kvality páleného dílce, případně k tvorbě zmetků.

Šířka stojiny – neboli vzdálenost mezi otvory nebo otvoru od vnějšího obrysu.
Viz tab.4.10.

Tab. 4.12 Min. šířka stojiny

Šířka stojiny	Tloušťka tabule do 3mm	Tloušťka tabule od 4mm
Minimální šířka stojiny	3 mm	4 mm

Minimální vzdálenost od okraje tabule pro kvalitní a bezpečný řezný proces činí neméně 10 mm. Toto pravidlo platí i pro vzdálenost jednotlivých dílců od sebe (náběhy mimo obrys patří k dílci).

4.5 Rozbor součástkové základny z hlediska přesnosti vyráběných součástí [12, 17]

4.5.1 Přesnost laserového řezání na laseru Bystronic

U laserového obrábění existuje pět nejdůležitějších parametrů, které se vzájemně ovlivňují a lze jimi ovlivnit a optimalizovat kvalitu řezání. Jsou to:

- poloha ohniska – mění se podle stavu čočky. Zašpiněná nebo stará čočka posouvá polohu ohniska nahoru (i několik mm),
- výkon laseru,
- tlak plynu
 - o řezání s kyslíkem (O_2) – max. tlak 24 barů. U kyslíku způsobí vyšší hodnota vyšší teplotu řezání a hrubší plochu řezu,
 - o řezání s dusíkem (N_2) – max. tlak plynu 24 barů,
 - o řezání se stlačeným vzduchem – max. tlak 12 barů,
 - o u stlačeného vzduchu a u dusíku bude materiál silněji vyfukovaný a více ochlazovaný.
- posuv

Tab. 4.13 Posuv

Posuv	rychlost
max. posuv	6 m/min
přednastavený posuv	5,4 m/min
minimální posuv	4,2 m/min

- výška trysky

Tab. 4.14 Výška trysky

výška trysky	vliv na trysku nebo materiál
menší než 1mm	větší opotřebení a zašpinění trysky
více než 1mm	klesá kvalita řezu

Důvody pro přizpůsobování těchto parametrů jsou: rozdílné materiálové složení materiálu, rozdílné vlastnosti materiálu a odchylky v tloušťce desky plechu.

Tab. 4.15 Pořadí nastavování řezných parametrů

KROK	Řezání kyslíkem	Řezání dusíkem	Řezání stlač. vzduchem
1	poloha ohniska	poloha ohniska	poloha ohniska
2	výkon laseru	posuv	posuv
3	tlak plynu	výkon laseru	výkon laseru
4	posuv	tlak plynu	tlak plynu
5	výška trysky	výška trysky	výška trysky

4.5.2 Přesnost vyrobených dílců

Tab. 4.16 Dosažitelná přesnost dílce

Dosažitelná přesnost dílce a kvalita				
Tloušťka tabule [mm]	Délka dílců [mm]			
	0 - 10	10 - 100	100 - 300	300 - 1000
0,5 - 2,9	±0,10 mm	±0,10 mm	±0,20 mm	±0,25 mm
3 - 5,9	±0,20 mm	±0,20 mm	±0,20 mm	±0,25 mm
6 - 9,9	±0,20 mm	±0,20 mm	±0,20 mm	±0,30 mm
10 - 14,9	±0,25 mm	±0,25 mm	±0,30 mm	±0,30 mm
15 - 19,9	±0,30 mm	±0,30 mm	±0,30 mm	±0,30 mm
20 - 25	±0,35 mm	±0,35 mm	±0,35 mm	±0,40 mm
Dosažitelná přesnost dílce a kvalita				
Tloušťka tabule [mm]	Délka dílců [mm]			
	1000 - 2000	2000 - 3000	3000 - 4000	
0,5 - 2,9	±0,30 mm	±0,40 mm	±0,50 mm	
3 - 5,9	±0,40 mm	±0,50 mm	±0,60 mm	
6 - 9,9	±0,40 mm	±0,50 mm	±0,60 mm	
10 - 14,9	±0,40 mm	±0,60 mm	±0,80 mm	
15 - 19,9	±0,50 mm	±0,60 mm	±0,80 mm	
20 - 25	±0,60 mm	±0,70 mm	±1,00 mm	

4.6 Rozbor součástkové základny z hlediska technologie výroby [12, 17]

4.6.1 Gravírování

Po zkušenostech vyplývajících z výroby při zavedení laseru se upustilo od předpalování děr pro výrobu závitů, a tvarů které se dále obrábí na konvenčních strojích. Toto opatření se zavedlo z důvodu rychlého opotřebení nástrojů při následném obrábění (převážně vrtáky, závitníky, frézy). Ke snížení trvanlivosti bříty dochází kvůli tepelně ovlivněné zóně materiálu. Hodnoty velikostí zón jsou vypsány v následující tabulce 4.10.

Tab. 4.17 Zóna tepelného ovlivnění

Tloušťka tabule [mm]	Zóna tepelného ovlivnění v [mm]		
	Konstrukční ocel	Korozivzdorná ocel	Hliník
1	0,05	0,05	0,1
2	0,1	0,1	0,2
3	0,15	0,15	0,3
4	0,2	0,25	0,4
5	0,25	0,35	0,5
6	0,3	0,55	0,6
8	0,4	0,75	0,7
10	0,5	0,85	-
12	0,6	-	-

Proto se pro tyto díry používá pouze tzv. gravírování (označení místa na obrobku pro vrtanou díru).

Použití gravírování:

Označování dílců pomocí křížků pro vrtání otvorů, místa ohybu.

Používané plyny:

Je možné gravírovat při použití jak kyslíku, tak dusíku.

Mělo by se rýt stejným plynem jako se reže – odpadá tak čas na proplach.

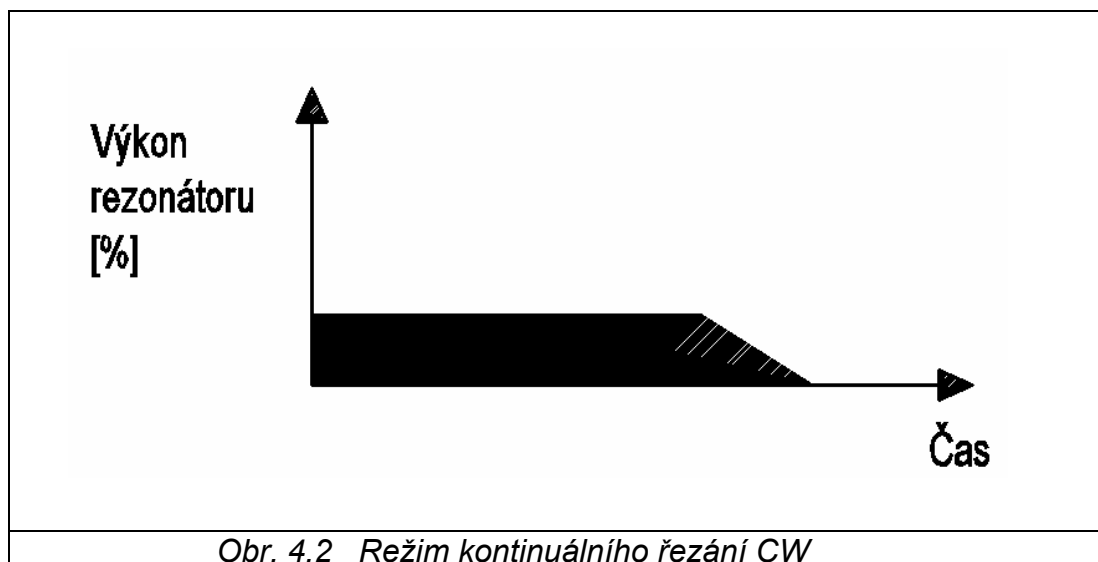
Nevhodné pro rytí jsou silně odrazivé materiály.

4.6.2 Řezání pomocí makra

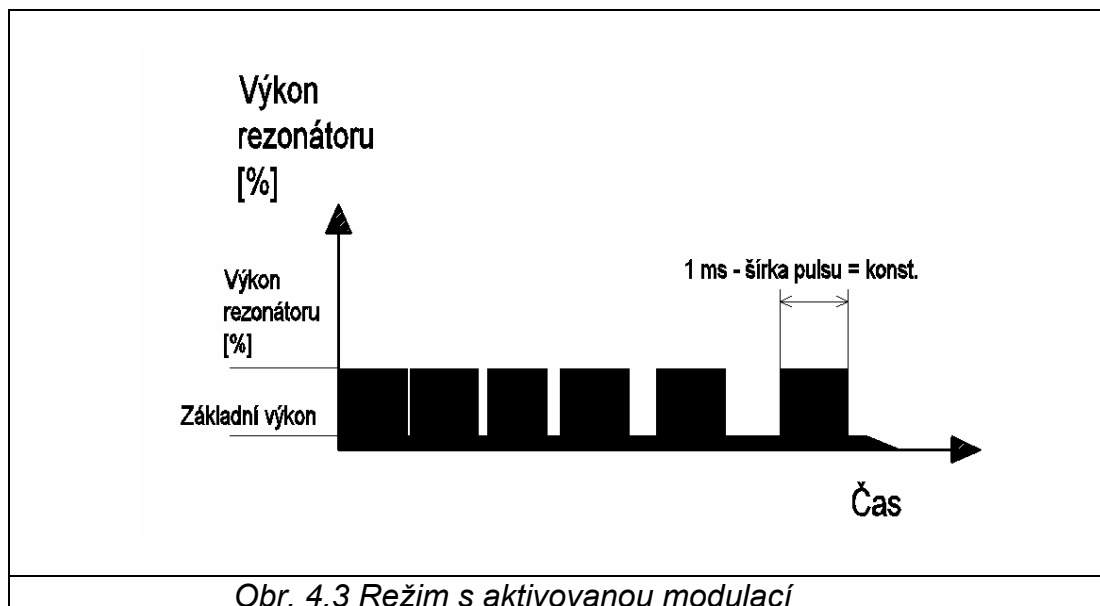
- makro 1 – pro malé obrysy,
- makro 2 – obrábění tenkých plechů, najetí do tlusté desky plechu (naříznutí),
- makro 3,4 – individuální aplikace,
- makro 5 – odpařování ochranných fólií z plechových tabulí z korozivzdorných ocelí.

4.6.3 Možnosti režimů

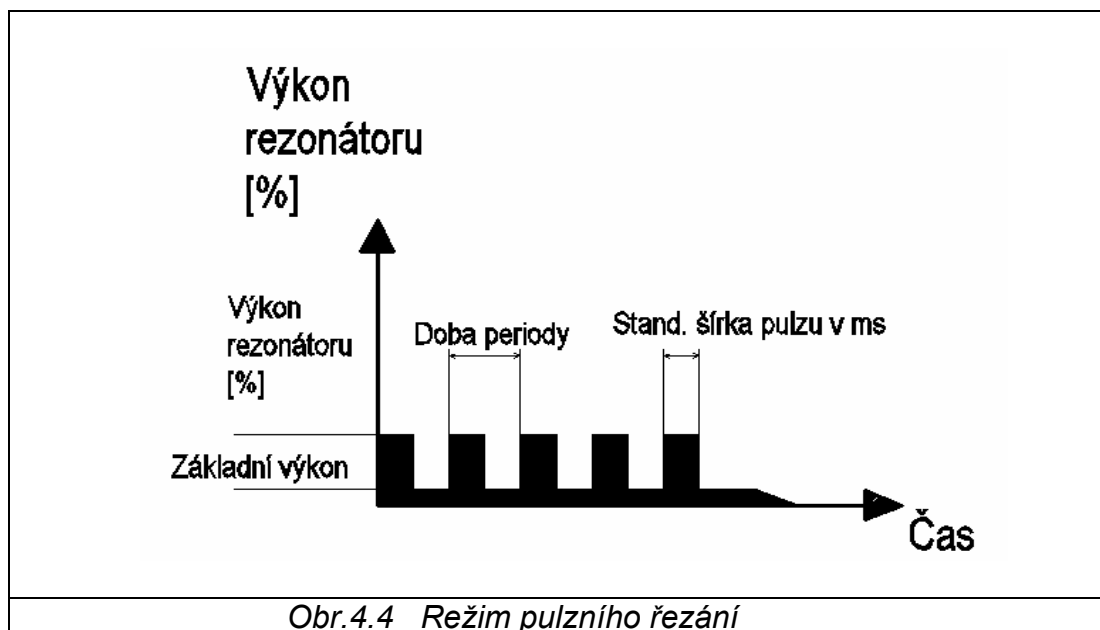
A. Režim kontinuálního řezání CW



B. Aktivovaná modulace – výkon laseru se automaticky přizpůsobuje osově rychlosti. (zabrání se přepalování materiálu např. v rozích)



C. Režim pulzního řezání PW



5 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY SOUČÁSTI, PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části této diplomové práce bude ukázán návrh postupu výroby součásti. Cílem bude ověření si možností pálení součástí složitých tvarů s větší tloušťkou stěny laserem Bystronic 3015 z oceli 11 373, tedy oceli obvyklé jakosti.

Součásti vyrobené z tabulí menších tloušťek mají výrazně lepší kvalitu řezu. Ta je ve většině případů dostačující a dále se již nemusí obrábět.

U součástí o tloušťce větší jako cca 6mm se kvalitu povrchu výrazně mění. Velmi často se obrobek následně obrábí tak, aby se kvalita povrchu zvýšila – jde hlavně o odstranění nebo zkvalitnění místa řezu.

Příkladem součásti, u které je řez tvořen složitou křivkou, je řetězové kolo.

5.1 Výroba řetězového kola pro řetěz 12B1

5.1.1 Popis kola

Jako příklad ozubeného kola, které se vyrábí ve firmě Manex, a. s. je ozubené řetězové kolo na obr.5.1. Výkres je přiložen v příloze č.1.

Používá se pro přenos síly v kontinuálních elevátorech pomocí řetězu 12B1.

Elevátor slouží k vertikálnímu přesunu kusového zboží z běžné dopravní úrovně cca 1.000 mm do požadované výškové úrovně navazujícího dopravníku nebo naopak. [17]



Obr. 5.1 Řetězové kolo

5.1.2 Možnosti polotovaru

U výroby ozubených kol větších rozměrů lze použít několik variant polotovarů:

- přířez z kruhové tyče – nevhodný z hlediska velkého úběru materiálu, tedy velkého odpadu materiálu,
- výkovek/odlitek – vhodný pouze pro velké série,
- svarek – nejvhodnější pro použití v případě výroby menších sérií.

Svarek je v případě malosériovosti výroby ve firmě Manex Co, a.s., nejvýhodnější.

Pro výrobu se použije svarek náboje (pro usazení ložisek) a kotouče.

5.1.3 Postup výroby

Pro výrobu tohoto kola se používá následující technologický postup:

- I. uřízne se požadovaný přířez o průměru 50mm (pro výrobu náboje) ,
- II. náboj se hrubuje na požadované rozměry,
- III. na laseru se vypálí talíř o tl. 14. mm. Tloušťka plechu je 14mm. Je větší než potřebná tloušťka 11mm, která je normalizovaná pro výrobu ozubení řetězového kola velikosti 12B1. Větší tloušťka tohoto talíře se volí z důvodu přídavku materiálu pro následné obrábění (soustružení). Tím se odstraní možné házení, které může vzniknout při výrobě kola – největší riziko vzniká při svařování náboje a talíře v jeden celek;
- IV. svaření talíře k nahrubovanému náboji,
- V. soustružení na čisto na dané rozměry (soustružení boku talíře na tl. 12mm, Soustružení centrální díry, zkosení boků v místě ozubení),
- VI. frézování ozubení,
- VII. odjehlení,
- VIII. povrchová úprava – galvanické pozinkování (kooperace).

Změna v technologickém postupu:

Cílem bude ověření si možnosti výroby ozubení řetězového kola z materiálu ČSN 41 1373 přímo na laseru, bez nutnosti následného obrábění ozubení frézováním. Tím by se čas výroby jednoznačně zkrátil a pravděpodobně by došlo ke snížení výrobních nákladů na toto řetězové kolo.

5.2 Výroba testovacích kusů

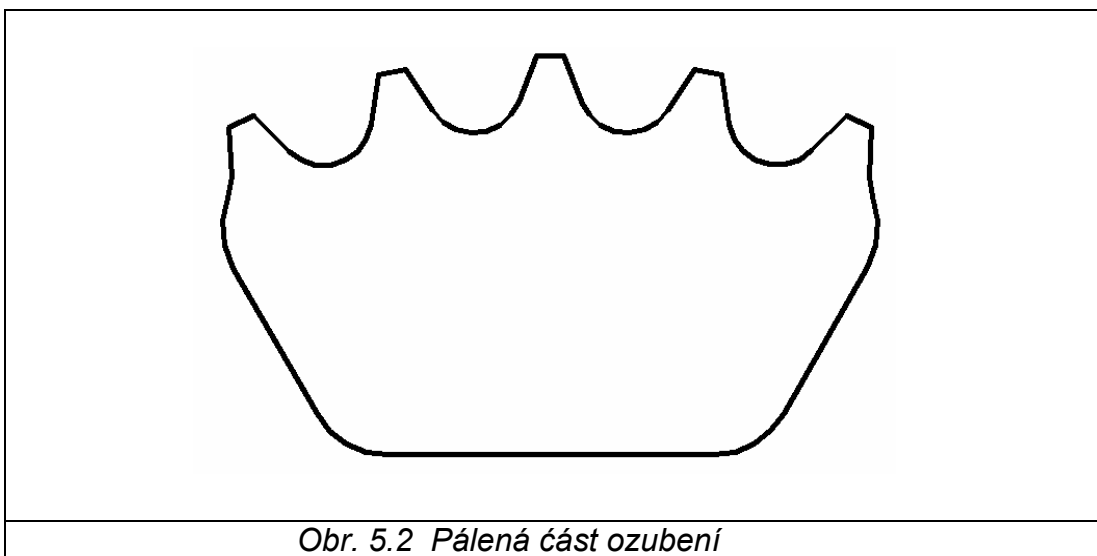
Při výrobě součástí laserem nelze předem stanovit kvalitu výsledného výrobku. Ta záleží na mnoha parametrech popsaných v předchozích kapitolách (tloušťka materiálu, rozličnost tvaru výsledného výrobku, kvalita a druh materiálu, druh řezání, nastavení parametrů stroje, zvolený typ plynu).

Zvolené parametry:

U řetězového kola tvoří funkční plochu ozubení, při pálení laserem jde tedy o kvalitu povrchu vzniklou řezem paprsku převážně na ozubení.

Pro velkou spotřebu materiálu nebylo tedy pro testovací kusy pálené celé řetězové kolo, ale pouze část ozubení o 6 zubech, nutných pro vyhodnocení řezu. Pálená část je na obr. 5.2. a podrobnosti jsou uvedeny v příloze č. 2 a 3.

Pokus byl proveden z tabule plechu o tloušťkách 14 mm a pro srovnání i z tabule o tloušťce 12mm

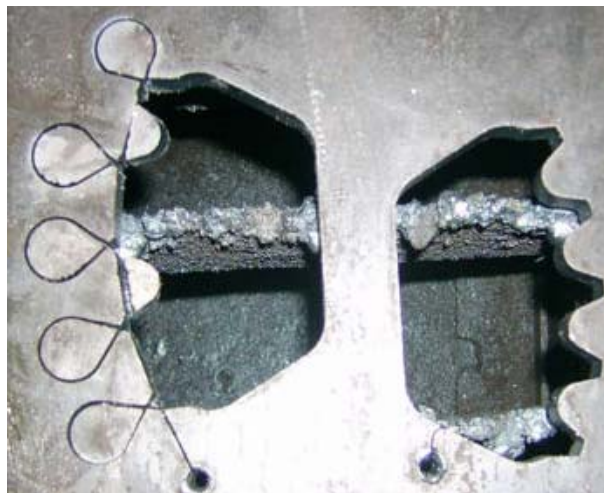


Obr. 5.2 Pálená část ozubení

Jednotlivé parametry, které byly zvoleny pro pálení jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 5.1 Výpal č.1, 2

číslo výpalu	1, 2
ocel	11373
tloušťka tabule	14mm
použitý plyn	O ₂
tryska	NK17
ohnisko	0,4
druh řezání	CW
rychlost řezání	920 mm/min
délka propalu	2s
vzdálenost trysky při propalu	6 mm
výkon při propalu	100%
vzdálenost trysky při řezání	1 mm
výkon při řezání	70%
modulace	20%
základní výkon	5%
tlak při propalu	3 bar
tlak při řezání	0,5 bar



Obr. 5.2 Trajektorie trysky 1. vzorku (vpravo) a 2. vzorku (vlevo)

Tab. 5.2 Výpal č.3

číslo výpalu	3.
ocel	11373
tloušťka tabule	14mm
použitý plyn	O ₂
tryska	NK17
ohnisko	0,4
druh řezání	CW
rychlost řezání	800 mm/min
délka propalu	2s
vzdálenost trysky při propalu	6mm
výkon při propalu	100%
vzdálenost trysky při řezání	1mm
výkon při řezání	70%
modulace	25%
základní výkon	5%
tlak při propalu	3bar
tlak při řezání	0,5 bar

Tab. 5.3 Výpal č.4

číslo výpalu	4.
ocel	11373
tloušťka tabule	14mm
použitý plyn	O ₂
tryska	NK17
ohnisko	0,6
druh řezání	CW
rychlost řezání	800 mm/min
délka propalu	2s
vzdálenost trysky při propalu	6mm
výkon při propalu	100%
vzdálenost trysky při řezání	1mm
výkon při řezání	70%
modulace	25%
základní výkon	5%
tlak při propalu	3bar
tlak při řezání	0,5 bar

Tab. 5.4 Výpal č.5

číslo výpalu	5.
ocel	11373
tloušťka tabule	14mm
použitý plyn	O ₂
tryska	NK17
ohnisko	0,6
druh řezání	CW
rychlost řezání	1000 mm/min
délka propalu	2s
vzdálenost trysky při propalu	6mm
výkon při propalu	100%
vzdálenost trysky při řezání	1mm
výkon při řezání	70%
modulace	25%
základní výkon	5%
tlak při propalu	3bar
tlak při řezání	0,5 bar

Tab. 5.5 Výpal č.6

číslo výpalu	6.
ocel	11373
tloušťka tabule	14mm
použitý plyn	O ₂
tryska	NK17
ohnisko	0,6
druh řezání	CW
rychlost řezání	1200 mm/min
délka propalu	2s
vzdálenost trysky při propalu	6mm
výkon při propalu	100%
vzdálenost trysky při řezání	1mm
výkon při řezání	70%
modulace	25%
základní výkon	5%
tlak při propalu	3bar
tlak při řezání	0,5 bar

Tab. 5.6 Výpal č.7

číslo výpalu	7.
ocel	11373
tloušťka tabule	12mm
použitý plyn	O ₂
tryska	HK15
ohnisko	0,4
druh řezání	CW
rychlost řezání	1050 mm/min
délka propalu	1,5s
vzdálenost trysky při propalu	6mm
výkon při propalu	100%
vzdálenost trysky při řezání	1mm
výkon při řezání	70%
modulace	25%
základní výkon	5%
tlak při propalu	3bar
tlak při řezání	0,5 bar

Tab. 5.7 Výpal č.8

číslo výpalu	8.
ocel	11373
tloušťka tabule	12mm
použitý plyn	O ₂
tryska	HK15
ohnisko	0,3
druh řezání	CW
rychlost řezání	950 mm/min
délka propalu	1,5s
vzdálenost trysky při propalu	6mm
výkon při propalu	100%
vzdálenost trysky při řezání	1mm
výkon při řezání	70%
modulace	25%
základní výkon	5%
tlak při propalu	3bar
tlak při řezání	0,5 bar

Tab. 5.9 Výpal č.9

číslo výpalu	9.
ocel	11373
tloušťka tabule	12mm
použitý plyn	O ₂
tryska	HK15
ohnisko	0,3
druh řezání	CW
rychlost řezání	1100 mm/min
délka propalu	1,5s
vzdálenost trysky při propalu	6mm
výkon při propalu	100%
vzdálenost trysky při řezání	1mm
výkon při řezání	70%
modulace	25%
základní výkon	5%
tlak při propalu	3bar
tlak při řezání	0,5 bar

Tab. 5.9 Výpal č.10

číslo výpalu	10.
ocel	11373
tloušťka tabule	12mm
použitý plyn	O ₂
tryska	HK15
ohnisko	0,46
druh řezání	CW
rychlost řezání	1100 mm/min
délka propalu	1,5s
vzdálenost trysky při propalu	6mm
výkon při propalu	100%
vzdálenost trysky při řezání	1mm
výkon při řezání	70%
modulace	28%
základní výkon	5%
tlak při propalu	3bar
tlak při řezání	0,5 bar

Tab. 5.10 Výpal č.11

číslo výpalu	11.
ocel	11373
tloušťka tabule	12mm
použitý plyn	O ₂
tryska	HK15
ohnisko	0,46
druh řezání	CW
rychlost řezání	1250 mm/min
délka propalu	1,5s
vzdálenost trysky při propalu	6mm
výkon při propalu	100%
vzdálenost trysky při řezání	1mm
výkon při řezání	70%
modulace	28%
základní výkon	5%
tlak při propalu	3bar
tlak při řezání	0,5 bar

Tab. 5.11 Výpal č.12

číslo výpalu	12.
ocel	11373
tloušťka tabule	12mm
použitý plyn	O ₂
tryska	HK15
ohnisko	0,46
druh řezání	CW
rychlost řezání	800 mm/min
délka propalu	1,5 s
vzdálenost trysky při propalu	6 mm
výkon při propalu	100%
vzdálenost trysky při řezání	1mm
výkon při řezání	70%
modulace	19%
základní výkon	5%
tlak při propalu	3bar
tlak při řezání	0,33 bar

Další možnosti nastavení parametrů při řezání laserem

- použití dusíku – pro tloušťky nad 6mm nereálné (softwarové omezení),
- nemožnost tvorby řetězového kola z korozivzdorné oceli (možnost pálení jen do tl. 10mm).

5.3 Kontrola výpalů

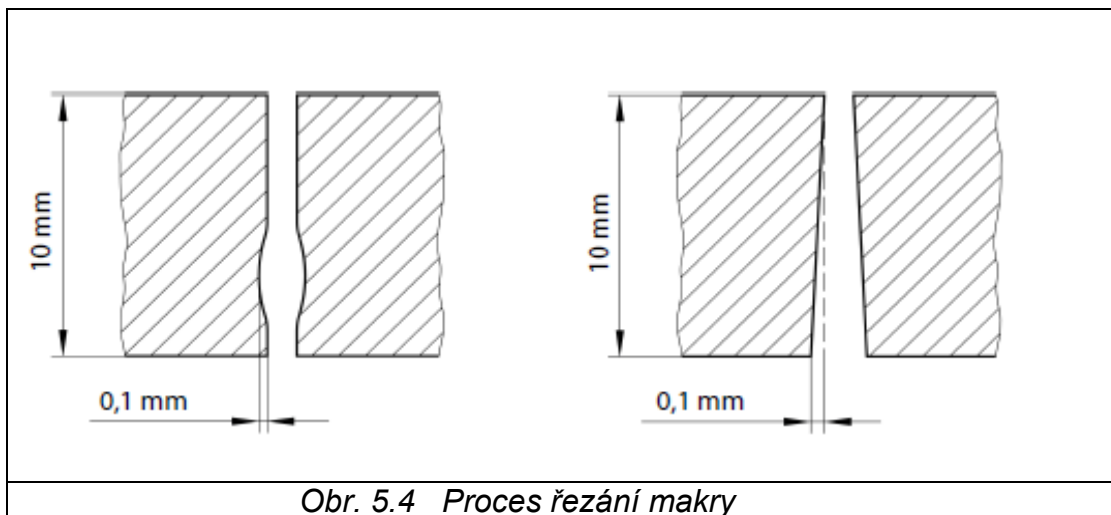
U výpalů byly měněny všechny dostupné parametry tak, aby se dosáhlo co nejlepší kvality řezu. Vzorky byly vizuálně vyhodnoceny. Po srovnání výpalů, se jako nejlepší se jeví výpal číslo 1, kde je kvalita povrchu ze všech výpalů nejlepší. Ale i u tohoto vzorku jsou na povrchu řezu vady, které povrch znehodnocují.



Obr. 5.3 Výpaly z tabule tloušťky 14 mm

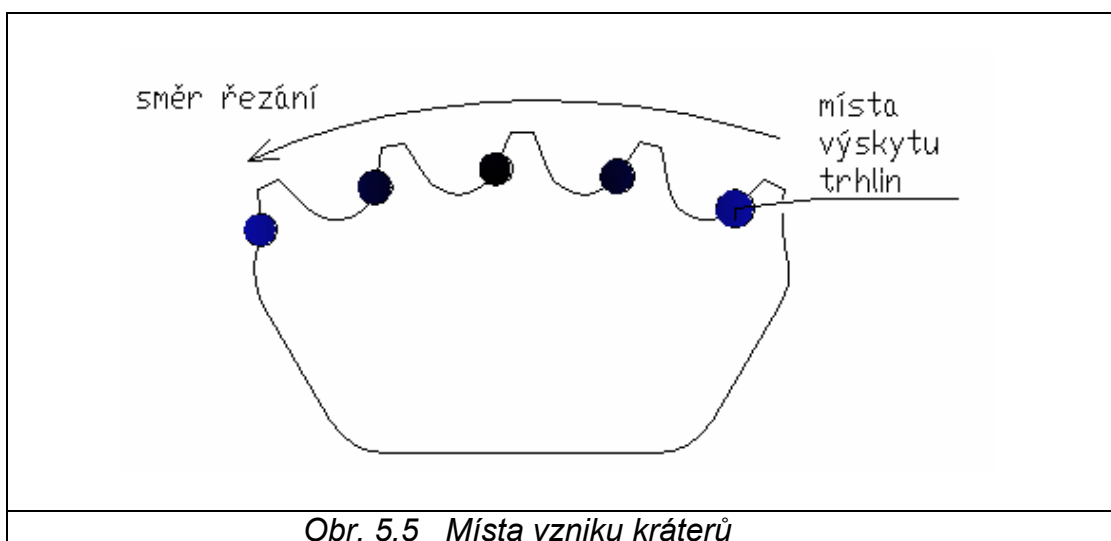
Zjištěné závady:

- pravoúhlost řezu - zkosení zubů –dle [12] je odpovídající pro řez laserem viz.obr.5.4. Tuto nerovnost však lze upravit následným obráběním,

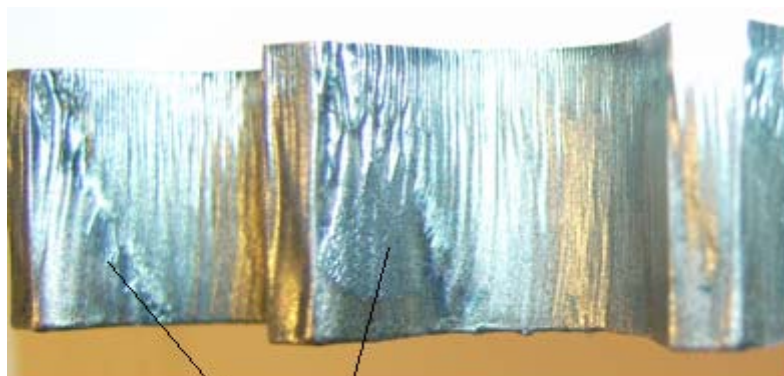


Obr. 5.4 Proces řezání makry

- zoxidovaná vrstva – obvyklá pro řez kyslíkem, snadno odstranitelná,
- rýhy na povrchu ozubení – nekvalitní struktura povrchu. Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a dosahuje vysokých hodnot. Parametry struktury povrchu R_a a R_z nebyly změřeny z důvodu možného poškození profiloměru,
- krátery na povrchu. Vznikají pouze na jedné straně zubu. Pravděpodobnou příčinou je přehřátí kovu – zub řetězového kola představuje pro tuto tloušťku zubu příliš úzkou stojinu. Při řezání jedné strany zubu se materiál zahřeje a při řezání druhé strany má materiál již vysokou teplotu a materiál se začíná natavovat. Viz. obr.5.5 a obr.5.6.



Obr. 5.5 Místa vzniku kráterů

**KRÁTERY***Obr. 5.6 Krátery na jedné straně zubu*

- u vzorku číslo 6 tl. 14mm se na spodní straně objevil návar materiálu, v důsledku velkého natavení materiálu.

*Obr. 5.7 Návar na spodní straně řezu*

5.4 Zhodnocení výpalů

Porovnáním textury povrchu řezu vzniklého výpalu (obr.5.9) s povrchem řezu, který je uveden jako zdárný příklad řezu od výrobce laseru (obr.5.8) lze konstatovat, že textura obou povrchů je srovnatelná. Tato textura odpovídá optimálnímu řezu pro tento typ oceli.

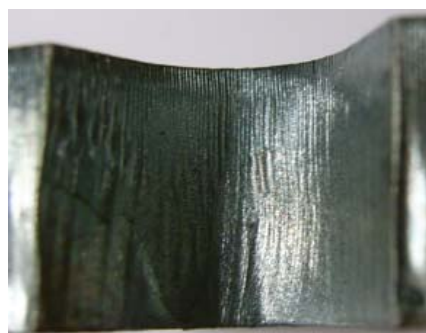
Konstrukční ocel tl. 4mm - CW



Konstrukční ocel tl. 10mm - CW



Obr. 5.8 Kvalitní řez materiálu v konstr. oceli (dle výrobce)



Obr. 5.9 Nejlepší vyhodnocený řez vzorku č.1

Vzniklou řeznou hranu, tedy tvar ozubení nelze hodnotit jako optimální. Toto ozubení nelze považovat za výsledný tvar.

Z uvedených zjištění lze konstatovat, že pálení laseru na výrobky větších tloušťek lze použít pro výrobu polotovarů, tedy výrobků, které budou následně obráběny – například pro dokončovací metody (broušení).

Pálení pomocí přednastavených hodnot v případě pálení ozubení, které bylo navrženo jeví jako nejvýhodnější z hlediska kvality řezu.

Pro optimální řez je nutné použít ocel RAEX 420 Laser. Její dobré vlastnosti se s zvětšující se tloušťkou výrazně zlepšují [18]. Z této oceli bylo pálené ozubené kolo, kde výsledná kvalita povrchu dostačovala nárokům povrchu ozubeného kola. Následné obrábění již nebylo nutné. Toto ozubené kolo bylo pálené z tabule plechu tloušťky 20mm. Vzorek pro ozubené kolo, pálený v této diplomové práci nebyl ale vytvořen z tohoto materiálu. Důvodem je vysoká pořizovací cena materiálu. Výsledný povrch obrobku vypáleného z RAEX 420 Laser tloušťky 20mm je znázorněn na obr. 5.10.



Obr. 5.10 Jakost povrchu při řezání oceli značky RaEX 20mm

6 TECHNICKO - EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Veškeré náklady vynaložené na provoz laseru se přepočítávají na 1 sekundu provozu, při maximálním použití (maximální spotřebě plynů). Tento přepočet se používá opět z důvodu rozličnosti výroby. Nelze přesně identifikovat, přesné množství, které se bude v následujícím období vyrábět, tedy jaká bude poptávka. Výpočet nákladů na 1 sekundu pálení umožňuje stanovit i předběžnou kalkulaci pro jednotlivé poptávky. K tomu je potřebné ale znát časy pálení jednotlivých ocelí. Tyto časy jsou odlišné nejen pro jednotlivé tloušťky ocelí, ale závisí i na typu materiálu. V tab. 6.1, 6.2 jsou znázorněny časy pálení jednotlivých ocelí.

Tab. 6.1 Časy pálení korozivzdorné oceli

Korozivzdorná ocel	
Tl. materiálu [mm]	Čas pálení 1bm [s]
0,3	8,0
0,5	8,0
0,8	8,0
1	8,0
1,3	9,0
1,5	9,0
2	11,0
2,5	14,0
3	17,0
4	26,0
5	34,0
6	46,0
8	78,0
10	108,0

Tab. 6.2 Časy pálení nelegované oceli

Nelegovaná ocel			
Tl. materiálu [mm]		Čas pálení 1bm [s]	
0,3	8,0	5	24,0
0,5	8,0	6	30,0
0,8	8,0	8	41,0
1	8,0	10	46,0
1,3	10,0	12	58,0
1,5	10,0	14	68,0
2	11,0	15	68,0
2,5	13,0	16	68,0
3	16,0	18	99,0
4	19,0	20	99,0

6.1 Spotřeba plynů

Výpočet spotřeby plynů v rezonátoru / měsíc

Tab. 6.3 Ceny pronájmu lahví

Sazby za pronájem lahví (50l) a za plyn			
Druh plynu	Pronájem na den	Pronájem na měsíc	Cena pl. v jedné lahvi
N ₂ /láhev	9,00 Kč	279 Kč	1 650 Kč
He ₂ /láhev	9,00 Kč	279 Kč	3 400 Kč
CO ₂ /láhev	9,00 Kč	279 Kč	1 720 Kč

Tab. 6.4 Ceny za spotřebovaný plyn za měsíc

Cena spotřebovaného plynu za měsíc		
Druh plynu	Spotřebované množství plynu za měsíc	Cena plynu spotřebovaného za měsíc
N/láhev	125l	4125 Kč
He/láhev	125l	8500 Kč
CO ₂ /láhev	10l	344 Kč

Tab. 6.5 Celková cena za plyn za měsíc

Celková cena za plyn za měsíc (vč. lahví)	
Druh plynu	Celková cena
N/láhev	4 404 Kč
He/láhev	8 779 Kč
CO ₂ /láhev	623 Kč
Součet	13 806 Kč

6.2 Výpočet fixních nákladů

Tab.6.6 Výpočet fixních nákladů

Fixní náklady / měsíc	
Náklady (el.energie+ spotř. plyny)	18 800 Kč
Mzdy	70 000 Kč
Leasing	80 000 Kč
Servis a investice	10 000 Kč
Výdaje na správu	70 000 Kč
Součet	248 800 Kč

Ceny fixních nákladů přepočtené na 1s pálení

Vychází se z údajů odpracovaných hodin předešlého měsíce

Tab.6.7 Fixní náklady přepočtené na 1s

Ceny fixních nákladů přepočtené na 1s pálení	
Počet odpracovaných dnů	18 dnů
Počet směn za den	2 směny
Celkový počet odpracovaných hodin za měsíc	288 hod
Celkový počet odpracovaných minut za měsíc	17280 min
Celkový počet odpracovaných sekund za měsíc	1036800 s
Fixní náklady za 1s	0,24 Kč/s

6.3 Výpočet variabilních nákladů

Tab. 6.8 Cena řezných plynů

Cena řezných plynů	
Druh plynu	Cena plynu
Dusík	8 Kč/l
Kyslík	13 Kč/l

Tab. 6.9 Cena dusíku/1s

Spotřeba dusíku	
Max odběr 17bar	50m ³ /hod
Odběr za 1s	0,02 m ³
Cena dusíku jako řezného plynu přepočtená na 1s pálení	0,12 Kč

Tab. 6.10 Cena dusíku/1s

Spotřeba kyslíku	
Max odběr 2,5bar	10m ³ /hod
Odběr za 1s	0,003m ³
Cena kyslíku jako řezného plynu přepočtená na 1s pálení	0,04 Kč

Tab. 6.11 Cena el. energie/1s

Spotřeba elektrické energie přepočtená na 1s	
Spotřeba el. energie	30, 72 kW/hod
Cena 1kW/hod	3 Kč
Spotřeba el. energie za 1sec	8,54 W
Cena el. energie za 1s	0,0256 Kč

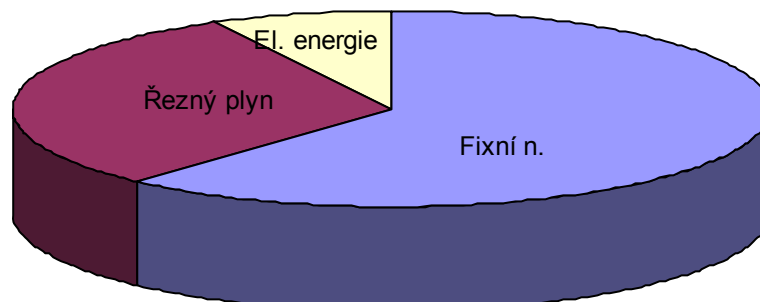
6.4 Celkové náklady na 1 sekundu provozu laseru

6.4.1 Celkové náklady na pálení za 1 sekundu při použití dusíku

Tab. 6.12 Náklady na provoz laseru při použití dusíku

Cena pálení za sekundu při použití dusíku	
Fixní náklady za 1s	0,24 Kč/sec
Cena dusíku jako řezného plynu přepočtená na 1s pálení	0,12 Kč/sec
Cena el. energie za 1s	0,03 Kč/sec
Součet	0,39 Kč/sec

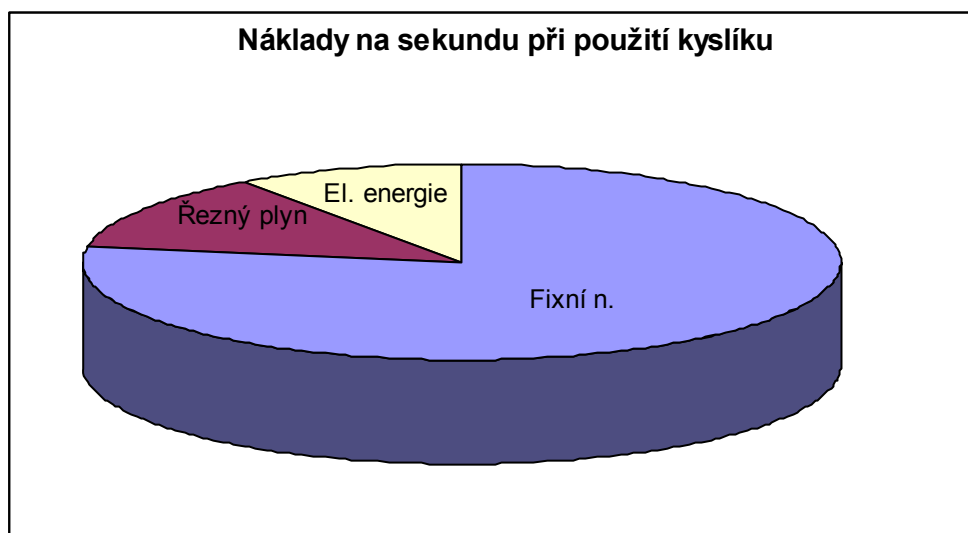
Náklady na sekundu při použití dusíku



6.4.2 Celkové náklady na pálení za 1 sekundu při použití kyslíku

Tab. 6.13 Náklady na provoz laseru při použití kyslíku

Cena pálení za sekundu při použití kyslíku	
Fixní náklady za 1s	0,24 Kč/sec
Cena kyslíku jako řezného plynu přepočtená na 1s pálení	0,04 Kč/sec
Cena el. energie na 1s	0,03 Kč/sec
Součet	0,31 Kč/sec



6.5 Ekonomické zhodnocení vyráběného řetězového kola

6.5.1 Výpočet nákladů při výrobě na CNC laserovém zařízení Bysprint 3015

Dle údajů v řezacím plánu (příloha č. 4) se ozubení na vyráběném řetězovém kole z tabule plechu tloušťky 14 mm vyrábí 57 sekund. Ozubené kolo je vyráběné při použití kyslíku. Náklady na výrobu jsou shrnuty v tab. 6.14.

Do této ceny jsou započítány pouze náklady na výrobu, není zde započítán materiál.

Tab. 6.14 Náklady na výrobu

Náklady na výrobu ozubení laserem	
Cena pálení za 1 sekundu při použití kyslíku	0,31 Kč/sec
Čas výroby řetězového kola	57 sec
Náklady na výrobu ozubení	17,7 Kč

6.5.2 Porovnání s dalšími variantami výroby

6.5.2.1 Výroba frézováním

Výroba ozubení ve firmě Manex & Co., a.s. je realizována frézováním. Jde o frézování ozubení dělicím způsobem, kotoučovou modulovou frézou. Cena výroby frézování je odvozena v následující tabulce 6.15. Frézovány jsou vždy 3 kola na jedno upnutí.

Tab. 6.15 Náklady na výrobu frézováním

Náklady na výrobu ozubení frézováním	
Cena 1 hodiny práce	220 Kč
Čas výroby ozubení řetězového kola	9,5 hod
Náklady na frézování ozubení	1900 Kč
Náklady na výrobu rondelu pr.188mm (výpal laserem)	10 Kč
Celkové náklady výroby na 3 kola	1910 Kč
Celkové náklady výroby jednoho kola	637 Kč



Obr. 5.11 Frézování drážek ozubení

6.5.2.2 Výroba vodním paprskem

Pro srovnání i dvou nekonvenčních technologií byla vytvořena poptávka u firmy disponující CNC zařízením vodního paprsku. Po zpracování byla odeslána nabídka na vytvoření ozubení. Cena jednoho kola při výrobě vodním paprskem tak, aby ozubení bylo kvalitní a odpovídající požadavkům, byla odhadnuta předběžně na 900 Kč, při výrobě většího množství by byla cena nižší o 20%. Jde již ale o cenu konečnou – tržní a ne cenu nákladovou.

ZÁVĚR

Metoda laserového obrábění, zvláště pak laserového řezání je stále více používanou metodou. Není ale vhodná do všech druhů výroby. Co se týče například hromadné výroby je lepší nasadit jinou variantu např. stříhání. Do kusového nebo malosériového typu výroby je ale obzvláště vhodná. To se také osvědčilo ve výrobním oddělení firmy Manex & Co., a. s. Nasazení laseru do výroby značně urychluje celkový výrobní proces. Kapacita laseru pokrývá požadavky na výrobu polotovarů firmy Manex & Co., a. s. a stačí pokrýt i poptávky přicházející od jiných zájemců.

Řezání laserem o výkonu 3000W je obzvláště výhodné pro plechy menších tloušťek (cca do 6mm). U těchto typů výpalů se řezná hrana nemusí již dále upravovat. U větších tloušťek rozhodnutí zda řeznou hranu obrábět či nikoli záleží již na funkci výrobku.

Jak je vidět z testovacích kusů, při řezání materiálů větších tloušťek má na kvalitu výsledného řezu hned několik parametrů. Jak je nejlépe nastavit nelze předem předikovat, můžeme se ale řídit přednastavenými hodnotami v programu CNC zařízení, které by měly zajistit optimální variantu řezu. Dle výsledků vypálených testovacích kusů a porovnáním kvality jejich řezné hrany lze konstatovat, že tyto přednastavené parametry jsou skutečně parametry optimálními. Kusy vypálené podle těchto parametrů vykazují jednoznačně nejlepší povrch. Při postupné změně parametrů se kvalita řezu nezlepšovala, ale zhoršovala. Bohužel, ani kvalita řezu podle přednastavených parametrů není mnohdy dostačující. To je případ výpalu řetězového kola vyráběného v rámci této diplomové práce, tedy typu výpalu, kde výsledný řez tvoří funkční plochu výrobku.

Co se týče technologického hlediska, kvalita povrchu je pro případ ozubení nevyhovující. Povrch vykazuje vady, nepřípustné pro funkční plochu.

Na druhou stranu z pohledu ekonomického, by v tomto případě bylo nasazení laserem výhodné. Došlo by tak nejen k finančním úsporám v rámci výrobních nákladů, ale také ke značnému zkrácení výrobního času (asi o 9 hodin).

Technologické hledisko má v poměru k hledisku ekonomickému výrazně vyšší váhu, tedy výroba tohoto kola z materiálu ČSN 41 1373 pomocí laserového zařízení je nevhodná. Východiskem je možná varianta změny materiálu například za ocel RAEX 420 Laser, ta je vyráběna přímo pro následné laserové obrábění, měla by tedy být pro výrobu vyhovující.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1.] Laser [online]. [cit. 2009-1-16]. Dostupné z WWW:
<<http://www.quido.cz/objevy/laser.htm>>
- [2.] Laser – Wikipedie [online]. [cit. 2009-1-16]. Dostupné z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser> >
- [3.] ŘASA, Jaroslav, JINDROVÁ, Radka: MM Průmyslové spektrum – Laser, laserové technologie a stroje s laserem [online]. [cit. 2009-1-16]. Dostupné z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>>
- [4.] JANATA, Marek, ing.: Průmyslové lasery a jejich aplikace [online]. [cit. 2009-1-16]. Dostupné z WWW:
<http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/pdf/Lasery_clanek-MJ.pdf>
- [5.] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana: MM Průmyslové spektrum: Nekonenční metody obrábění – 5. díl [online]. [cit. 2009-1-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenčni-metody-obrabeni-5-dil> >
- [6.] MINAŘÍK, Václav: Současné trendy použití laseru [online]. [cit. 2009-1-20]. Dostupné z WWW: <http://technik.ihned.cz/c4-10002530-13608860-800000_d-soucasne-trendy-pouziti-laseru>
- [7.] Linde gas, a. s.: Zpracování materiálu laserem [online]. [cit. 2009-1-26]. Dostupné z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_laser1>
- [8.] Maser – Wikipedie [online]. [cit. 2009-1-23]. Dostupné z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Maser>>
- [9.] Lasery [online]. [cit. 2009-1-23]. Dostupné z WWW: <<http://tc-pipa.wz.cz/lasery.html>>
- [10.] Laser [online]. [cit. 2009-1-23]. Dostupné z WWW:
<<http://referaty.atlas.sk/prirodne-vedy/fyzika-a-astronomia/2521/?print=1>>
- [11.] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*. Viena Košice, 2000. 270s. ISBN 80-7099-430.3.
- [12.] Bystronic Laser AG, 2007 : Laser – technologie řezání [cit. 2009-1-23], elektronická verze

- [13.] BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. Skriptum FSI ČVUT Vydavatelství ČVUT, Praha 1989. 122s
- [14.] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: *Fyzika, Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vydavatelství PROMETHEUS 2003. ISBN 81-7196-213-9
- [15.] Linde gas, a. s.: Průmyslové lasery [online]. [cit. 2009-1-26]. Dostupné z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_laser3>
- [16.] MANEX [online]. [cit. 2009-1-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.manex.cz>>
- [17.] Bysprint manuál udržby, vydání 04, 2003, elektronická verze
- [18.] LUKÁŠEK, Jaromír: Řezatelnost kovových materiálů [online]. [cit. 2009-1-16]. Dostupné z WWW: <http://www.welding.cz/vyvoj/svar_03/03_1-8.htm>
- [19.] Použití laseru [online]. [cit. 2009-1-20]. Dostupné z WWW: <<http://technik.ihned.cz/c1-30109000-svarovani-a-vytvrzovani-laserem-na-vnitrim-povrchu>>
- [20.] VÁVROVÁ, Jaroslava: [online]. [cit. 2009-1-16]. Dostupné z WWW: <http://ciselniky.dasta.mzcr.cz/CD_DS4/hypertext/JVABW.htm>
- [21.] Lasery a jejich aplikace [online]. [cit. 2009-1-16]. Dostupné z WWW: <<http://fyztyd.fjfi.cvut.cz/2000/web/2000/laser.html>>
- [22.] ŠULC, Jan: Průmyslové aplikace laserových systémů [online]. [cit. 2009-1-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>>
- [23.] CHPS, s. r. o. [online]. [cit. 2009-1-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.chps.cz/rezani-laserem/technologie.html>>
- [24.] Laser [online]. [cit. 2009-1-22]. Dostupné z WWW: <<http://ireferaty.lidovky.cz/302/1777/Laser>>
- [25.] Zpracování materiálu pomocí laseru [online]. [cit. 2009-1-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.maturita.cz/referaty/referat.asp?id=1358r>>

- [26.] ROUBÍČEK, Martin: Řezání CO2 laserem – Optický systém Bifocal [online]. [cit. 2009-1-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/rezani-co2-laserem-opticky-system-bifocal/>>
- [27.] Linde gas, a. s.: Procesy CO2 laseru [online]. [cit. 2009-1-26]. Dostupné z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_laserco2>
- [28.] Linde gas, a. s.: Plyny pro CO2 lasery [online]. [cit. 2009-1-26]. Dostupné z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_laser4>
- [29.] Linde gas, a. s.: Laserové plyny [online]. [cit. 2009-1-26]. Dostupné z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_laser2>
- [30.] Linde gas, a. s.: Zásobovací systémy pro lasery [online]. [cit. 2009-1-26]. Dostupné z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_laser8>
- [31.] Linde gas, a. s.: Plyny pro svařování laserem [online]. [cit. 2009-1-26]. Dostupné z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_laser7>
- [32.] Aplikace laserů [online]. [cit. 2009-1-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k31.htm>>
- [33.] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270s. ISBN 80-214-1996-2
- [34.] FÜRBAACHER, I., MACEK, K., STEIDL, J. a kolektiv: *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty*. Nakladatelství VERLAG DASHÖFER, s. r. o., 1999, ISBN:80-86229-02-5

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

f	$[s^{-1}]$	frekvence záření
h	$[J.s]$	Planckova konstanta
I_0	$[W.cm^{-2}]$	intenzita záření ve středu paprsku
I	$[W.cm^{-2}]$	výstupní intenzita výkonu
r_0	$[mm]$	poloměr paprsku
r	$[mm]$	poloměr
R_m	$[MPa]$	mez pevnosti materiálu
R_a	$[\mu m]$	průměrná aritmetická úchylka profilu
R_z	$[\mu m]$	největší výška profilu
E		velikost kvanta energie
E_1		energetická hladina
E_2		energetická hladina
Θ		divergence paprsku
λ_w		vlnová délka

Prvky periodické tabulky:

Al	hliník
C	uhlík
Cr	chrom
Cu	měď
Fe	železo
Mo	molybden
Mn	mangan
Mg	hořčík
N	dusík
Ni	nikl
P	fosfor
Ti	titan
S	síra
Si	křemík
Zn	zinek

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výkres - svarek řetězového kola
Příloha 2	Seznam instrukcí BYWORK
Příloha 3	Seznam instrukcí BYWORK
Příloha 4	Seznam instrukcí BYWORK