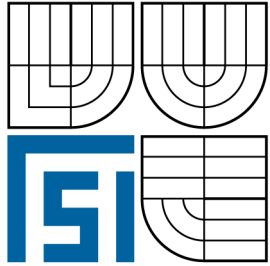


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NASAZENÍ LASEROVÉ TECHNOLOGIE
V PODMÍNKÁCH ZAKÁZKOVÉ VÝROBY
USE OF LASER TECHNOLOGY IN CONDITIONS OF JOB-ORDER MANUFACTURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN POPELA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Popela Martin, Bc.

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

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

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 laserové technologie v podmínkách zakázkové výroby

v anglickém jazyce:

Use of laser technology in conditions of job-order manufacture

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nasazení laserové technologie v podmínkách zakázkové výroby ve firmě NTS Prometal s.r.o.

Cíle diplomové práce:

Rozbor součástkové základny.

Technologičnost typových představitelů.

Provozní náročnost použití staršího typu stroje.

Organizace TPV pro laserové pracoviště.

Návrhy na opatření na zvýšení produktivity pracoviště laserové technologie.

Technicko - ekonomické vyhodnocení.

Seznam odborné literatury:


1. BARCAL, J. Nekonvenční metody obrábění, Skriptum FSI ČVUT, Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.
2. KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. MAŇKOVÁ, I. Progresivní technologie, 1 vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
4. OBERG, E., JONES, F.D., HORTON, H.L., RYFFEL, H.H. Machinery's hand-book. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. 2547 s. ISBN 0-8311-2595-0.


Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 19.11.2008




doc. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu


doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Martin Popela

Bytem: Kúty 1942, 760 01 Zlín

Narozen/a (datum a místo): 21. 9. 1983 ve Zlíně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

se sídlem Technická 2896/2, 616 69 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Článek 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Nasazení laserové technologie v podmínkách zakázkové výroby

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Karel Osička

Ústav: Ústav strojírenské technologie

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2 Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3 Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. 4. 2009

.....
doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

.....
Autor

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na teoretický rozbor a fyzikální popis technologie laserového paprsku. Pojednává o možnostech a konkrétních metodách laserových technologií z hlediska opracování kovů, detailně se věnuje CO₂ laseru z hlediska zařazení do výroby v konkrétní strojírenské firmě. Je rozebrána součástková základna a popsána technologičnost konstrukce typových představitelů. Dále je uveden návrh řešení na zvýšení produktivity laserového pracoviště a provedeno technicko-ekonomické vyhodnocení.

Klíčová slova

Nekonvenční technologie, laser, paprsek, řezání, plyn, metody, popis, výroba, součást, řešení.

ABSTRACT

The thesis is focused on theoretical analysis and physical description of laser beam technology. It deals with possibilities and concrete methods of laser technologies in perspective of metal machining and in detail it describes CO₂ laser and its inclusion to the manufacturing process in concrete engineering company. Further it describes the components base and the construction technology of typical representatives. The thesis includes the proposition of solution of increase the productivity of the laser workplace and also technical and economical evaluation of this technology.

Key words

Unconventional technologies, laser, beam, cutting, methods, description, manufacture, component, solution.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POPELA, Martin. *Nasazení laserové technologie v podmínkách zakázkové výroby: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 72 s., 3 přílohy. Ing. Karel Osička, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Nasazení laserové technologie v podmínkách zakázkové výroby* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

15. 10. 2009

.....
Martin Popela

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji Janu Juříkovi, technologovi pracoviště laserové technologie ve firmě NTS Prometal Machining, s.r.o.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod	9
1 TEORETICKÝ ROZBOR LASERU	11
1.1 Princip obrábění laserovým paprskem	11
1.2 Popis hlavních částí laserového zařízení.....	11
1.3 Druhy laserů používané ve strojírenské výrobě.....	12
1.3.1 Plynové lasery.....	13
1.3.2 Pevnolátkové lasery.....	18
1.3.3 Vláknové lasery	20
1.4 Výkon laseru a jeho intenzita	21
1.5 Použití laseru pro opracování materiálů.....	21
1.5.1 Rozdělení laserových technologií obrábění dle způsobu použití	22
1.5.2 Řezání a dělení materiálů laserem (LM)	22
1.5.3 Řezání kovových materiálů	23
1.6 Porovnání řezání CO ₂ laserem s jinými technologiemi.....	25
2 PŘEDSTAVENÍ FIRMY NTS PROMETAL MACHINING	27
3 ROZBOR SOUČÁSTKOVÉ ZÁKLADNY	29
3.1 Tvarové hledisko	29
3.2 Materiálové hledisko.....	30
3.3 Tloušťkové hledisko.....	31
3.4 Formáty plechů.....	32
3.5 Výpočet plochy základních formátů plechů	32
4 TECHNOLOGIČNOST TYPOVÝCH PŘEDSTAVITELŮ	34
4.1 Postupy laserového řezání	34
4.1.1 Tavné laserové řezání	34
4.1.2 Řezání v oblasti plazmy	35
4.1.3 Laserové pálení	35
4.1.4 Sublimační laserové řezání	36
4.2 Řezací proces.....	37
4.2.1 Parametry plynu	37
4.2.2 Spotřeba rezného plynu	38
4.3 Specifikace obráběných materiálů	39
4.4 Pravoúhlost rezné plochy	39
4.5 Hrubost rezné plochy	40
4.6 Rádiusy na obrysech.....	42
4.7 Tloušťka plechu a rezná rychlost.....	43
4.8 Návrh výroby konkrétního výpalku	44
5 PROVOZNÍ NÁROČNOST POUŽITÍ STARŠÍHO TYPU STROJE	50
5.1 Konstrukční princip laserového zařízení <i>Bystronic Bystar 3015</i>	50
5.2 Seznam a popis jednotlivých komponentů stroje.....	50
5.3 Technická data	56
5.3.1 Mody práce laseru.....	57
5.4 Ovládání plynů.....	57

5.4.1 Základní pojmy	57
5.4.2 Použití plynů.....	58
5.4.3 Charakteristiky laserových plynů	58
5.4.4 Charakteristiky procesních plynů.....	59
5.5 Programovací software <i>Bysoft</i>	59
5.5.1 Základní moduly	60
5.5.2 Doplnkové moduly.....	60
6 ORGANIZACE TPV VE FIRMĚ NTS PROMETAL MACHINING	61
6.1 Specifikace požadavku pro technologickou kooperaci	61
6.2 Vypracování úkolových listů	61
6.3 Specifikace náradí pro výrobu	61
6.4 Specifikace přípravků pro výrobu a jejich konstrukce	61
6.5 Zajištění náradí.....	62
6.6 Plánování výroby.....	62
6.7 Výrobní dokumentace	62
6.8 Průběh výroby	62
6.9 Uvolnění výrobku	63
6.10 Záznamy o jakosti	63
7 NÁVRH NA OPATŘENÍ NA ZVÝŠENÍ PRODUKTIVITY PRACOVIŠTĚ LASEROVÉ TECHNOLOGIE	64
7.1 Návrh řešení – nový laser.....	64
7.2 Srovnání současného a navrhovaného laseru.....	65
8 TECHNICKO – EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ.....	67
Závěr	68
Seznam použitých zdrojů	69
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	71
Seznam příloh.....	72

ÚVOD

Označením *Nekonvenční metody obrábění* jsou rozuměny způsoby obrábění, které většinou nevyužívají mechanické práce pro úběr materiálu, což je jeden z nejnázornějších rozdílů mezi nekonvenčními a klasickými technologiemi třískového obrábění. Nekonvenční metody obrábění využívají k úběru materiálu fyzikálních či fyzikálně-chemických principů, přičemž se tyto děje obejdou bez silového působení na obráběný materiál a bez vzniku třísek.

Slovo **LASER** je zkratkou anglických slov *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, což lze přeložit jako *zesílení paprsků světla pomocí vynucené emise záření*. Obrábění laserem (**LBM** – **Laser Beam Machining**) je jedna z mnoha průmyslových aplikací laserového paprsku.

První popis teoretických základů vynucené emise záření podal již v roce 1917 *Albert Einstein*. Začátky kvantové elektroniky však byly položeny až na počátku 20. století, kdy byla realizována zařízení generující a zesilující elektromagnetické záření na principu stimulované emise záření.

V roce 1958 *C. H. Towns* a *A. L. Shawlow* navrhli první laser, v roce 1960 zkonstruoval první rubínový laser *T. H. Maiman*. Poté došlo k realizaci dalších zařízení. V roce 1961 začal intenzivní vývoj dalších typů laserů s rozvojem laserové technologie. V témže roce *Snitzer* poprvé použil pevnolátkový laser na bázi neodym (Nd) – sklo. V roce 1962 byl objeven polovodičový laser. S plynovým CO₂ laserem, který má v současné průmyslové výrobě nejširší uplatnění, poprvé experimentoval roku 1964 *C. H. Patel*. První krůčky kapalinového laseru byly uskutečněny v roce 1966.

První praktické využití laseru pro vrtání otvorů do diamantových kalibrů (konkrétně se jednalo o rubínový laser) se datuje na rok 1966.

Od roku 1971 pak dochází k enormnímu rozvoji laserové technologie, v současné době je laser široce využíván v různých odvětvích, např.:

- průmyslové aplikace (řezání, vrtání, svařování, kalení, legování, nanášení povlaků, tváření, obrábění, tepelné zpracování povrchů) pro opracování materiálů jako kompozity, plasty, keramika, sklo, diamant, obtížně obrobitelné oceli,
- lidská medicína („laserový skalpel“),
- přehrávače CD, DVD,
- metrologické systémy,
- nedestruktivní testovací metody,
- informační a telekomunikační technologie (přenos a uchovávání informací),
- astronomie,
- geodézie,
- chemie,
- biologie,

- spektroskopie,
- energetika,
- vojenská technika,
- automatizace,
- dálkové řízení.

(1, 2, 3)

1 TEORETICKÝ ROZBOR LASERU

1.1 Princip obrábění laserovým paprskem

LASER, nebo-li zesílení paprsků světla pomocí vynucené emise záření, je ve své podstatě generátor elektromagnetického záření v optické oblasti vlnových délek. Vynucené záření vzniká potlačením spontánního záření, kdy se vybuzený atom prvku vrací do základního stavu vlivem energie přijaté dopadem záření. Spontánní emise záření vzniká ve chvíli, kdy vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a při tom emitují kvantum světelného záření o frekvenci f a s energií, která je dána vztahem:

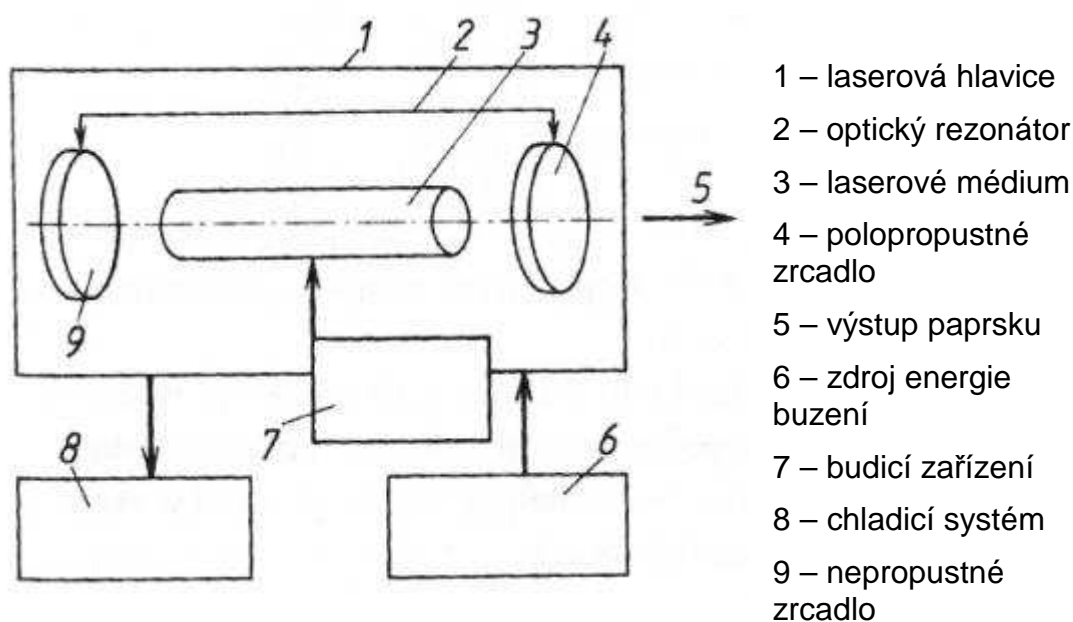
$$h \cdot f = E_2 - E_1 \quad (1.1)$$

kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ je Planckova konstanta. (2, 4, 12)

Další příjem energie vyvolá vyzáření atomem přijaté energie do prostoru. Toto záření je vysoce monochromatické (má prakticky jedinou vlnovou délku), koherentní (fotony se v paprsku pohybují jedním směrem, kmitají se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku a v jeho průřezu jsou velmi pravidelně rozmístěny) a vyniká nízkou divergencí (rozbíhavostí) svazku (všechny fotony laserového záření se pohybují stejným směrem). Ze všech druhů záření těmito vlastnostmi vyniká právě jen laserové. (2, 4, 12)

Vlastnosti laserového paprsku umožňují jeho fokusací soustředit vysokou hustotu energie do místa dopadu paprsku a tím dosáhnout požadovaného natavení či odpaření obráběného materiálu. (2)

1.2 Popis hlavních částí laserového zařízení



Obr. 1.1 Schéma laserového zařízení (4)

- **Laserová hlavičce** – obsahuje laserové médium, rezonátor, polopropustné a nepropustné zrcadlo.
- **Optický rezonátor** – neustále vrací část stimulované emise záření do laserové dutiny. Jedná se o optický systém, který umožňuje zformovat a zesílit záření, tj. elektromagnetickou vlnu z něj vycházející. Je tvořen nejméně dvěma zrcadly, jeho konstrukce má zásadní vliv na vlastnosti paprsku.
- **Zdroj energie buzení** – jedná se o speciální druh síťového napáječe.
- **Budicí zařízení** – ovlivňuje pracovní režim laseru, způsob buzení je dán laserovým médiem. Plynné médium je buzeno téměř vždy elektrickým výbojem, stejnosměrným nebo střídavým proudem. Pevné laserové médium je nejčastěji buzeno lampami (výbojkami) nebo diodami, ve zvláštních případech i zářením jiného laseru (např. polovodičového).
- **Chladicí systém** – odvádí tepelnou energii jako nevyužitou energii, která se nepřemění v záření. Nejčastěji používaným druhem chlazení pro zpracování materiálů je chlazení vodou. Chladicí okruh má dvě větve: vnitřní (používá se deionizovaná voda) a vnější (voda z vodovodní sítě nebo ze speciálního zásobníku s čerpadlem). Ve speciálních případech se používají také zařízení s vnitřním okruhem chlazeným vzduchem.

(2, 4, 9)

1.3 Druhy laserů používané ve strojírenské výrobě

Jak již bylo vyjmenováno v úvodu, možnosti použití laserů jsou v současné době poměrně široké a rozmanité. Ve strojírenské výrobě jsou používány především lasery plynové a pevnolátkové, jejichž charakteristika je uvedena v následujících podkapitolách.

Tab. 1.1 Rozdělení laserů (2)

Druh laseru	Aktivní látka		Vlnová délka [μm]	Typ paprsku	Výkon laseru	Oblasti použití
PEVNÝ	Rubín	Cr ³⁺	0,6943	pulsní	5 W	Holografie
	Nd - YAG	Nd ³⁺	1,064	kontinuální pulsní	100 až 1 200 W	Strojírenský průmysl
	Nd - sklo	Nd ³⁺	1,064	pulsní	2 mW	
	alexandrit		0,7 až 0,818	pulsní	10 W	
POLOVODIČOVÝ	GaAs		0,80 až 0,90	pulsní	2 až 10 mW	Informační technologie Optoelektronika
PLYNOVÝ	CO ₂ (N ₂ + He)	CO ₂	10,6	kontinuální nebo pulsní	500 až 20 000 W	Strojírenský průmysl
	He - Ne	Ne	0,6328; 1,15; 3,39	kontinuální	20 mW	Metrologie Geodézie Holografie

	Ar	Ar ⁺	0,4764; 0,488; 0,5145	kontinuální nebo pulsní	1 až 5 000 W	Laserová chirurgie
	Excimer (ArCl)		0,17	pulsní	20 až 250 W	Fotolitografie Laserová chirurgie Strojářství
	(XeCl)		0,308			
	(XeF)		0,351			
	(KrF)		0,248			
KAPALINOVÝ	Barvivo Rhodamine 6	Etanol, metanol	0,34 až 1, 175	pulsní	100 W	Fotochemie Spektroskopie

Tab. 1.2 Klasifikace laserových technologických operací podle DIN 8580 (2)

PRIMÁRNÍ TVAROVÁNÍ	TVÁŘENÍ	ŘEZÁNÍ	SPOJOVÁNÍ	POVLAKOVÁNÍ	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ
Stereo- litografie	Tváření laserovým ohřevem (ohýbání)	Řezání: sublimační, tavné, s aktivním plynem	Svařování	Povrchové legování	Kalení
Spékání		Vrtání	Pájení	Plazma CVD	Žihání
		Gravírování			Zpevňování
		LAM (Laser Assisted Machining)			
		Označování			

1.3.1 Plynové lasery

Aktivní prostředí plynových laserů je v plynné fázi. Tato zařízení jsou schopna pracovat v kontinuálním i pulsním režimu. Plynové lasery je možné budít elektrickým výbojem, chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku rychlých elektronů nebo opticky. Konkrétně se jedná o měděné lasery, vodíkové lasery, helium-kadmiové lasery, helium-neonové lasery, jódomé lasery, argonové lasery, dusíkové lasery, excimerové lasery, CO₂ lasery. (4)

Co se týká technologie opracování materiálů, pro řezání a svařování se používají především CO₂ lasery, pro popisování, mikroobrábění keramických materiálů, obrábění diamantu, čištění povrchů strojních součástí i uměleckých děl a vrtání děr průměru 10 μm a více. (4)

Technické plyny

Použití technických plynů u laserových zařízení se dělí do dvou oblastí: (13)

1. technický plyn jako pracovní náplň (pouze plynové lasery)
2. technický plyn jako asistenční plyn či ochranná atmosféra

Jak již bylo uvedeno, z hlediska aplikace ve strojírenské výrobě jsou nejvíce užívány **lasery s plynovým aktivním prostředím** (technický plyn jako

pracovní náplň). Tyto plynové lasery jsou zpravidla pojmenovány podle druhu aktivního prostředí (pracovní náplně). Nejčastěji používaným představitelem této skupiny průmyslových laserů je CO₂ laser, jehož aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů CO₂, N₂ a He. Pomocí tohoto typu laseru je na následujících řádcích proveden pokus o vysvětlení významu jednotlivých složek aktivního prostředí. (13)

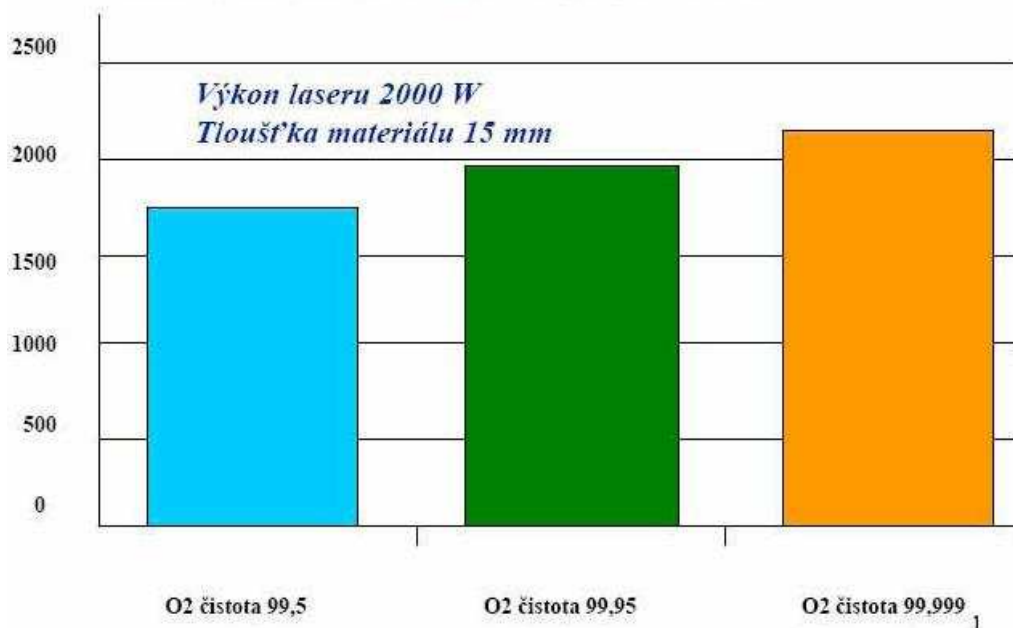
Stěžejní výhoda použití plynného aktivního prostředí spočívá především ve snadnějším odvodu tepla, které se může uskutečnit cirkulací. Ve složení směsi plynů zaujímá CO₂ 3 až 10%. Největší 80% podíl má He, jehož hlavním účelem v aktivním prostředí je odvod tepla, protože má velmi dobrou tepelnou vodivost. Dusík N₂, který bývá zastoupen maximálně 10% podílem, je schopen přijmout od He srážkovou energii a tu pak dalším srážkovým mechanismem předat molekule CO₂. Principem CO₂ laseru, který je podrobněji vysvětlen v samostatném oddíle níže, je pak vibrace molekul CO₂ doprovázená excitací a následným vyzařením fotonů s vlnovou délkou 10,6 μm. (13)

Technický plyn jako ochranná atmosféra se používá jak pro ochranu před okolní atmosférou tak i pro zajištění oxidační reakce na podporu spalování (pouze při tepelném dělení ocelových materiálů). Pro aplikace svařování či vytváření povrchových vrstev se speciálními vlastnostmi se používají inertní plyny Ar, He a N₂. (13)

Při technologiích řezání laserem se do fokusační hlavice laseru vhání pod tlakem plyn, který může vlastní proces urychlovat buď zintenzivněním spalování, nebo se jím vyhání tavenina z řezu, anebo je plyn primárně určen k ochlazení řezu. Podle těchto cílů se rozlišují základní metody dělení laserem tavné, oxidační a sublimační řezání. Tyto metody jsou podrobněji popsány v kapitole 4.1.

Následující obrázek (obr. 1.2) znázorňuje graf, který dokumentuje význam čistoty řezného asistenčního plynu O₂ při řezání oceli laserem.

VLIV ČISTOTY KYSLÍKU NA RYCHLOST ŘEZÁNÍ KONSTRUKČNÍ OCELI



Obr. 1.2 Vliv čistoty kyslíku na rychlost řezání konstrukční oceli (13)

CO₂ lasery

Jak již bylo uvedeno, CO₂ lasery jsou nejpoužívanější laserová zařízení pro řezání a svařování a to především díky svým výkonovým možnostem. Současné CO₂ lasery jsou schopny pracovat v pulsním i kontinuálním režimu. Z hlediska konstrukčního uspořádání se vyrábějí lasery s axiální a příčnou excitací aktivního prostředí. (4, 14)

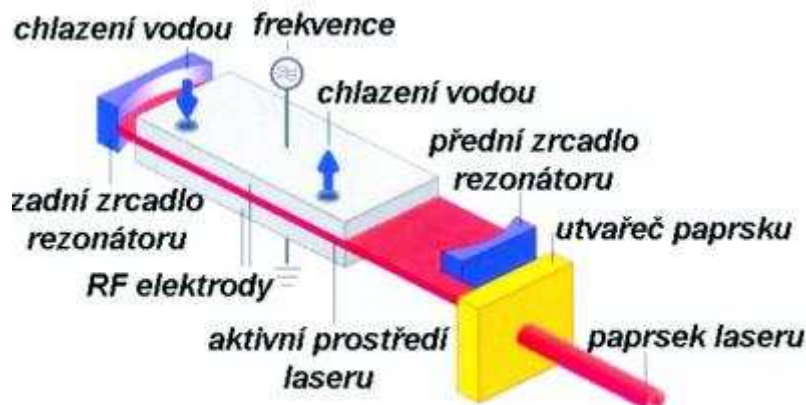
CO₂ laserová zařízení mohou dosahovat výkonu až 20 kW, běžně používané výkony se však pohybují mezi 500 až 5 000 W. Obecně jsou CO₂ lasery spínány elektronickým spínačem tak, že délka pulzů je v rozmezí od 0,1 ms do kontinuálního provozu (CW). Špičkový výkon pulzu u CO₂ laserů je normálně stejný jako maximální CW výkon, tzn. že průměrný výkon se při pulsaci snižuje. Výjimku tvoří zařízení, jež dokážou při pulsním provozu dosáhnout maximálního výkonu pulsu až 5krát vyššího, než je výkon v kontinuálním režimu CW. Této vlastnosti se říká superpulse. (14)

CO₂ lasery jsou používány k řezání, svařování, vrtání, popisování součástí, nanášení povlaků a tepelnému zpracování. (4)

Princip CO₂ laseru

CO₂ laser využívá ke vzniku stimulované emise záření kvantově energetické pochody související s oscilací molekul CO₂ a N₂. Aktivním prostředím jsou molekuly oxidu uhličitého. Buzení je prováděno elektrickým výbojem, který zapaluje směs plynů CO₂, N₂ a He a někdy i dalších přídatných plynů. Rezonátor CO₂ laseru emituje záření o vlnové délce 10,6 μm. CO₂ lasery existují v několika konstrukčních variantách rezonátorů,

systému proudění plynu a elektrického výboje. Každá z variant má svou vlastní specifickou charakteristiku (viz níže). (2, 4, 14)



Obr. 1.3 Konstrukce CO₂ laseru (4)

a) Axiální CO₂ lasery s pomalým prouděním

Jedná se o tradiční a konstrukčně nejstarší druh CO₂ laseru s rezonátorem s pomalým prouděním aktivních plynů. Energie se do aktivního prostředí přivádí prostřednictvím stejnosměrného nebo střídavého elektrického výboje. Směr tohoto výboje je shodný s osou rezonátoru i svazku emitovaného záření. Tento typ laserů dosahuje výkonu asi 50 W na jeden metr délky výbojové trubice v rezonátoru. Výstupní výkon na metr délky rezonátoru je však limitován možnostmi chlazení. (14)

Axiální CO₂ lasery s pomalým prouděním se vyznačují stabilním výstupním výkonem a dobrou modovou charakteristikou svazku záření. Důsledkem těchto vlastností je dosahování hladkých, jakostních řezů. Zařízení jsou schopna pracovat v režimu pulsním i kontinuálním, využívají se do výstupního výkonu asi 1 000 W. (14)

b) Axiální CO₂ lasery s rychlým prouděním

U těchto druhů CO₂ laserů proudí aktivní plyn rezonátorem vysokou rychlostí. Chlazení a regenerace plynu jsou realizovány mimo dutinu rezonátoru. (14)

Axiální CO₂ lasery s rychlým prouděním dosahují výkonu 500 až 1 000 W na jeden metr délky rezonátoru a v porovnání s axiálními CO₂ lasery s pomalým prouděním vynikají kompaktnější konstrukcí. Výsledná modová struktura svazku záření je obecně poměrně dobrá, často však dochází k rychlým fluktuacím modu, což může v důsledku vést ke zhoršení kvality řezu. Tyto lasery mohou pracovat také v pulsním provozu a to v širokých mezích, ale pomíjející fluktuace mohou způsobit horší stabilitu pulsů. (14)

Typický výkon laserových zařízení tohoto druhu se pohybuje od 1 000 do 5 000 W. Elektrické napájení je většinou stejnosměrné typu DC, nově jsou na trhu i tzv. RF – excitované lasery napájené vysokofrekvenčním střídavým proudem (řádově několik kiloherz) typu AC, které vynikají zvýšenou stabilitou paprsku. (14)

V současné době se používají RF stimulované lasery schopné pulsního i kontinuálního provozu o výkonech asi 5 kW a více, které jsou většinou využívány k řezání. (14)

c) CO₂ lasery s příčným prouděním

Tento typ CO₂ laseru vyniká velmi kompaktní konstrukcí. Laserový svazek, proudění plynu a elektrický výboj probíhají ve třech různých směrech. (14)

CO₂ lasery s příčným prouděním dosahují výkonu až 1 kW na jeden metr trubice rezonátoru. Mají však těžko říditelný elektrický výboj a modová struktura svazku je obecně méně příznivá než u jiných druhů CO₂ laserů. Zároveň tento typ laseru nelze provozovat v pulsním režimu. (14)

Příčná CO₂ laserová zařízení se používají v oblasti typického výkonu 1 až 20 kW. Většinou jsou využívána ke svařování a tepelnému zpracování, k řezání se nepoužívají skoro vůbec. (14)

Běžně jsou příčné CO₂ lasery excitovány DC výbojem (stejnosměrný proud). (14)

d) SLAB lasery

Konvenční CO₂ lasery využívají dlouhé cylindrické výbojové trubice, kde se tvoří plazma, která produkuje laserový svazek. Dosahovaný výkon (ve watttech) souvisí s délkou trubice, čím je tato trubice delší, tím vyššího výkonu laser dosahuje. (14)

Na jiné filozofii jsou založeny tzv. SLAB lasery, jejichž plazma se tvoří ve srovnání s konvenčními CO₂ lasery v relativně malém prostoru lichoběžníkového průřezu mezi dvěma paralelně zapojenými deskami. Zkratka SLAB v tomto případě označuje tvar elektrického výboje. Ten je udržován velkými elektrodami, které jednak tvoří základnu výboje a zároveň jsou využity k chlazení směsi. Tyto elektrody obvykle tvoří součást optického rezonátoru. Výkonově jsou na tom SLAB lasery obecně mnohem lépe než konvenční CO₂ lasery. (14)

Jestliže ještě v nedávné minulosti platilo, že čím výkonnější laser, tím větší velikost celého zařízení, současné konstrukční trendy se už soustředí i na kompaktnost a o SLAB laserech to platí dvojnásob.

Dnešní nové typy zatavených CO₂ laserů se SLAB technologií vynikají přibližně pouze 1/10 velikosti konvenčních CO₂ laserů. Skýtají tak v sobě možnosti využití při nových aplikacích a výrazně se tím rozšiřují možnosti jejich použití. Rozměry takových zařízení jsou dokonce natolik kompaktní, že

je lze dokonce spojit s pojmem „desktop manufacturing“. To dovoluje mnohým výrobcům, kteří dříve nemohli laserovou technologií použít, zařadit ji do výrobního procesu s ekonomickým efektem souvisejícím např. se zvýšením konkurenceschopnosti výrobků. (14)

Souhrn charakteristických vlastností SLAB CO₂ laserů: (14)

- Výstupní svazek záření z laseru může být fokusován do ohniska, které je více než čtyřikrát menší a ostřejší než u jakéhokoliv jiného druhu laseru. Z toho vyplývá potřeba menšího výkonu při obrábění materiálu a díky velké koncentraci energie i malou tepelně ovlivněnou oblast.
- Některá zařízení jsou také schopna generovat vysokofrekvenční pulsy se čtvercovou vlnou (square wave). To znamená, že ovlivňovaný materiál je vystaven výstupnímu výkonu cca třikrát většímu, než při kontinuálním provozu.

Unikátní vlastnosti zatavených CO₂ laserů kombinované s malým a ostrým ohniskem a čtvercovými pulsy velké intenzity umožňují při technologickém použití: (14)

- vyšší rychlost procesu,
- obrábění materiálů s větší tloušťkou,
- dosažení menší tepelně ovlivněné oblasti.

Tyto vlastnosti lze navíc dosáhnout: (14)

- s menším laserovým zařízením,
- s nižším výkonem,
- za kratší čas.

1.3.2 Pevnolátkové lasery

Obecně lze do této skupiny laserů zařadit všechna laserová zařízení, jejichž aktivní prostředí se nachází v pevném stavu. Tato látka zpravidla obsahuje ionty vzácných zemin popřípadě další prvky, kterými je poměrně malým podílem obohacena krystalová mřížka či amorfní matrice (sklo, keramika) nosného materiálu. Zdrojem stimulovaného záření jsou zde zmíněné aktivní ionty, přes jejichž absorpční pásy se obsazují příslušné energetické hladiny, mezi kterými dochází k inverzi. (12, 14)

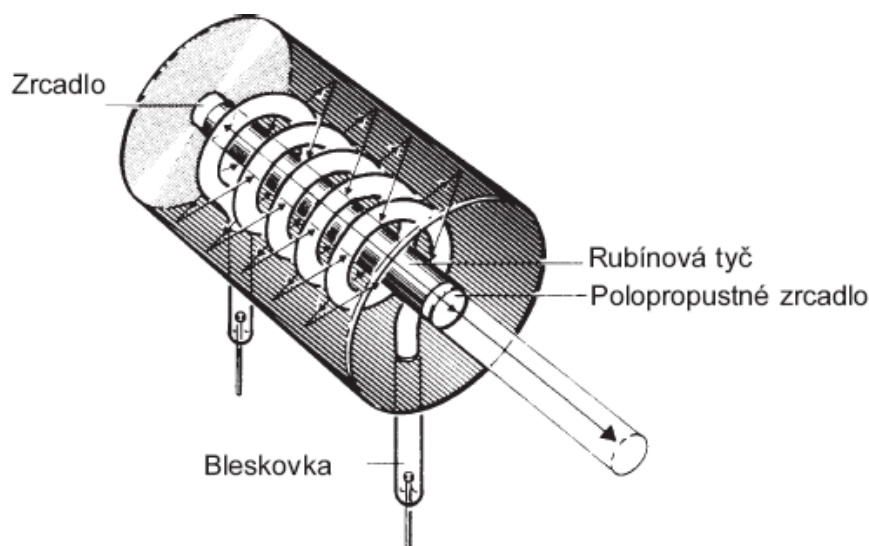
Z velkého množství existujících aktivních prostředí jmenujme ty, které mají význam pro technologické využití, tedy především rubínový laser a Nd – YAG laser. (14)

Rubínové lasery

Aktivní prostředí rubínového laseru tvoří safír dotovaný chromem – rubín, čili Al₂O₃ aktivovaný ionty Cr³⁺. Podíl Cr₂O₃ v Al₂O₃ tvoří přibližně 0,05% váhového množství. Rubínový laser má tři hladiny, k dosažení inverzního

stavu je nutné přečerpat alespoň polovinu iontů Cr^{3+} ze základního stavu na stav excitovaný. Takový úkon vyžaduje značnou energii, jejíž čerpání je prováděno absorpcí světelné energie z čerpacích výbojek. (12, 14)

Rubínové lasery pracují v pulsním režimu a v současné době se v průmyslové výrobě používají spíše výjimečně. (14)



Obr 1.4 Konstrukce rubínového laseru (18)

Nd-YAG lasery

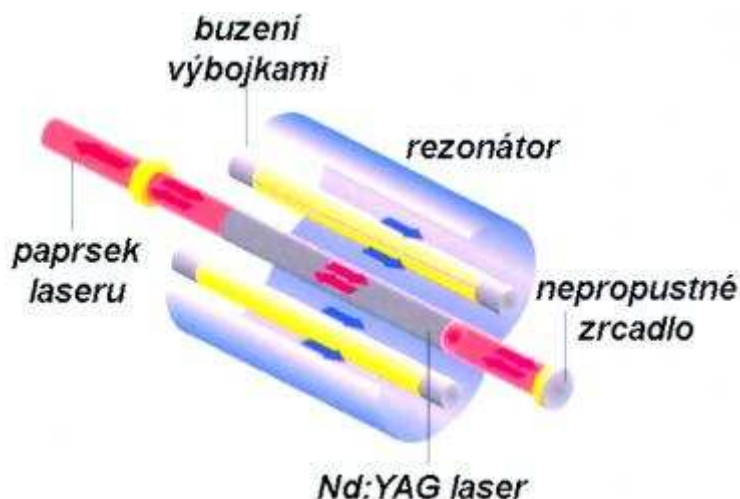
Nd-YAG lasery jsou v dnešní době nejrozšířenějšími a zároveň asi nejvíce technicky vyspělými pevnolátkovými lasery v průmyslové výrobě. Jejich aktivní prostředí tvoří yttrium aluminium granát $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ dopovaný neodymem, to vše v podobě tyčí kruhového průřezu, pro vyšší výkony se prosazuje spíše SLAB technologie (viz výše), tj. krystaly ve formě seříznutých kvádrů. Čerpací systém je tvořen jednou či více výbojkami, v případě YAG laseru na bázi kryptonu. Výbojky i krystal jsou intenzivně chlazeny deionizovanou vodou a jsou uzavřeny v dutině rezonátoru, která může mít různý tvar. Vždy se však volí tak, aby většina světla z výbojek byla odražena do krystalu. Dutina je za účelem zvýšení odrazivosti světla pokovená. (12, 14)

Vlnová délka záření Nd - YAG laserů je $1,064 \mu\text{m}$, typický výkon těchto zařízení se pohybuje do $1,5 \text{ kW}$. (14)

Malá účinnost pevnolátkových laserů (cca 5% až 10%) v porovnání např. s plynovými přináší určité problémy: zdroj energie je poměrně rozměrný a většina energie je přeměňována v teplo v aktivním prostředí, z čehož plynou vysoké nároky na chlazení. Pokud krystal dosáhne příliš vysoké teploty (jelikož se nestačí dostatečně chladit), tepelné pnutí může způsobit až jeho deformaci (zakřivení). Krystal potom působí jako čočka a degraduje mod záření. (14)

Kvalita svazku a možnost fokusace jsou velmi závislé na průměrném výkonu laseru. Velmi jemné a přesné řezání, svařování a vrtání může být dosaženo pouze při nízkých hladinách průměrného výkonu. Vysoce výkonné Nd - YAG lasery jsou proto v praxi používány jen pro svařovací aplikace. (14)

Jelikož se Nd - YAG lasery používají ve spojení s vláknovou optikou (záření jí prochází), lze tato zařízení spojovat a tím zvyšovat výkon svazku. (14)



Obr. 1.5 Konstrukce Nd - YAG laseru (4)

1.3.3 Vláknové lasery

Konstrukce účinných a odolných laserů je ve své podstatě nelehký úkol. Čím vyšší je výstupní výkon laseru, tím více tepla se musí odvádět. Pokud se toto v dostatečné míře neděje, v laseru vzniká pnutí. To má vždy negativní vliv na tvar laserového svazku – na jeho kvalitu – a v krajním případě může vést až k deformaci či poškození laserového zařízení. (16)

Velmi elegantní metodu, jak se tomuto problému vyhnout, představuje vláknový laser. Základem vláknového laseru je aktivní optické vlákno. Jeho velký povrch vzhledem k nepatrnému objemu zajišťuje rovnoměrné a účinné chlazení. Zrcadla rezonátoru jsou nahrazena tzv. Braggovskými mřížkami – strukturami vytvořenými ve vlákne. Buzení obstarávají polovodičové diody, které jsou s vláknem svázány MM spojkou. Vlnová délka je jako u Nd-YAG laserů 1,064 μm . Vlákno vede jen velmi úzký světelný paprsek, takže kvalita laserového svazku je vysoká. Tyto lasery mají vyšší účinnost přeměny elektrické energie na laserové záření (cca 25%). Pro své výkony se vláknové lasery nejčastěji používají pro značení materiálů. (14, 16)



Rozměry:

600 x 550 x 630 mm [š x v x h]

Obr. 1.6 LASERfibre LF20T - laserová stolní popisovací stanice s vláknovým laserem (17)

1.4 Výkon laseru a jeho intenzita

Velikost laseru je obvykle specifikována výkonem, např. 500 W nebo 1500 W. Laserový výkon je veškerá energie emitovaná ve formě laserového záření za sekundu. (14)

Intenzita laserového záření (hustota výkonu) je výkon laseru působící na plochu, na kterou je paprsek fokusován: (14)

$$I = \frac{P}{S} \quad (1.2)$$

Pro představu: fokusace 1000 W laserového svazku na průměr 0,1 mm dává hustotu výkonu cca 100 000 W.mm⁻².

Vysoké intenzity může být dosaženo jak v pulsním, tak v kontinuálním provozu. Špičková pulsní energie při pulsním řezání nebo průměrný výkon určují hloubku průniku. Řezná rychlost je determinována průměrnou hladinou výkonu laseru. (14)

1.5 Použití laseru pro opracování materiálů

Pro lasery využívané k účelům obrábění materiálů platí tyto specifické možnosti a přednosti: (2)

- tepelnou energii je možné koncentrovat na velmi malé plochy bez použití mechanických sil, což umožňuje obrábět i velmi křehké materiály bez mechanického namáhání,
- technologie umožňuje obrobit i místa konvenčními nástroji nedostupná (k přenosu laserového svazku paprsků na obtížně přístupná místa je možné použít zrcadlo nebo optický kabel),

- průměr ohniska laserového svazku lze použitím vhodné optiky měnit v širokém rozsahu, což umožňuje nastavovat výkonovou hustotu (intenzitu) paprsku,
- použití fokusovaného laserového paprsku umožňuje vytvářet extrémně úzkou řeznou spáru, důsledkem je úspora materiálu, omezení poškození okolního materiálu a malá tepelně ovlivněná oblast,
- laserový svazek lze zapínat či vypínat s vysokou přesností a rychlostí,
- řezný účinek laserového svazku má v rovině kolmé k ose svazku izotropní vlastnosti, což umožňuje řezání všemi směry a zároveň změnu směru řezu a libovolný úhel řezu,
- vzhledem k izotropním vlastnostem laserového svazku může být obrábění materiálů laserovým paprskem vysoce produktivní, pokud je spojeno s numerickým řízením,
- ve většině případů lze paprsek do materiálu vnořit, což umožňuje započítí řezu bez předvrtání,
- paprsek jako nástroj je chemicky čistý, takže obrábění je bez znečištění obráběného materiálu.

1.5.1 Rozdělení laserových technologií obrábění dle způsobu použití

V současné době se laserové technologie v procesech obrábění dělí podle způsobu použití do dvou skupin: (2)

- I. Laserové obrábění (LM – Laser Machining)** – představuje alternativu ke konvenčnímu obrábění, používá se pro řezání, vrtání, a tvarové opracování různých druhů materiálů.
- II. Laserem podporované obrábění (LAM – Laser Assisted Machining)** – představuje alternativu k procesu řezání a broušení tvrdých kalených materiálů a keramiky. LAM obrábění spočívá v ohřevu povrchu obrobku a následném řezání či broušení v plastickém stavu. Cílem tentokrát není natavení a následné odpaření materiálu, ale laser zde slouží jako intenzivní tepelný zdroj ke změně deformačního chování materiálu a jeho transformaci z křehkého na tvárné.

Další kapitoly se věnují laserovému obrábění typu LM.

1.5.2 Řezání a dělení materiálů laserem (LM)

Laser je univerzální nástroj pro technologii řezání vhodný pro sériovou, malosériovou výrobu, dodávky „Just In Time“ i pro výrobu v dávkách. (2)

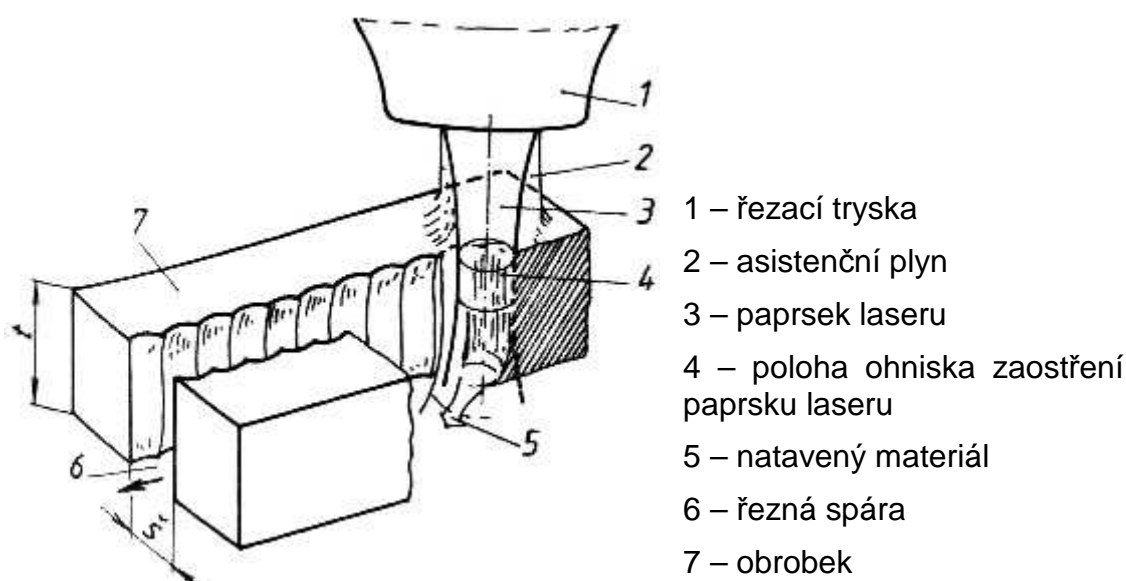
Řezání a gravírování patří mezi nejpoužívanější procesy laserového obrábění. (2)

Z technologického hlediska existují dvě metody LM řezání: (2)

- a) Řezání/dělení materiálů (pro plechy a jiné tenké materiály).
- b) Tvoření drážky na povrchu materiálu a následný kontrolovaný lom (křehké materiály – sklo, keramika)

Hlavní mechanismus úběru při řezání laserem se skládá z: (2)

- erozivního účinku vysokoenergetických částic fotonů na povrchu materiálu,
- lokálního natavení povrchu,
- odstranění taveniny odpařením nebo pomocí asistenčního stlačeného plynu, který tlakem vyfukuje taveninu materiálu z řezné spáry.

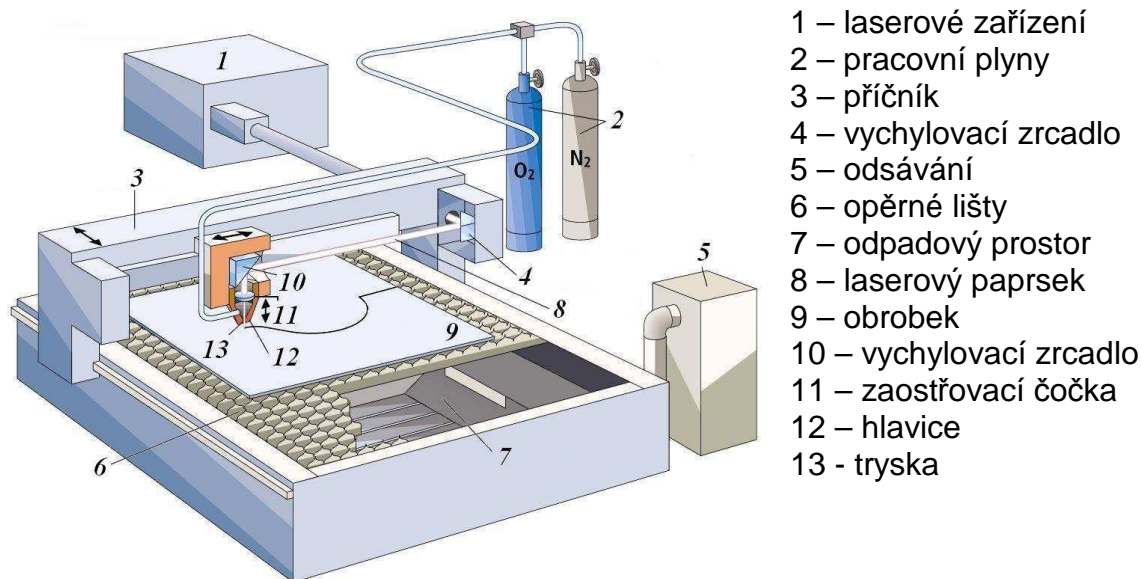


Obr. 1.7 Schéma procesu řezání materiálu laserem (9)

1.5.3 Řezání kovových materiálů

K dělení materiálů se nejvíc využívají CO₂ lasery většinou v kontinuálním režimu, které jsou schopné řezat konstrukční ocel do tloušťky 20 mm, korozivzdornou ocel do tloušťky 10 mm a slitiny hliníku do tloušťky 5 mm. (2, 9)

Pro přesnější řezy s menší šířkou řezné spáry jsou vhodnější spíše Nd – YAG lasery, schopné řezat konstrukční ocel do tloušťky 6 mm, korozivzdornou ocel do tloušťky 3 mm a slitiny hliníku do tloušťky 2 mm. (9)



Obr. 1.8 Schéma stroje pro řezání materiálu laserem (9)

Při řezání ocelových materiálů se rozlišuje druh oceli (měkká, nízkolegovaná, legovaná, korozivzdorná atd.), historie zpracování (plechy válcované za tepla, za studena) a dodatečné úpravy (povrchové úpravy, tryskané povrchy, pozinkované atd.), které je nutné brát v úvahu při návrhu použití laserové technologie. (2)

Stav povrchu po předcházející operaci ovlivní aplikaci laserového dělení stejně jako např. zbytky olejů a maziv, kontaminované produkty, korozní zplodiny a tvrdé oxidické povrchy, které mohou při řezání způsobovat znečištění prostředí. Oxidické vrstvy zpomalují rychlost řezání a zhoršují kvalitu řezu tvorbou otřepů ve formě kapek materiálu ve spodní části řezu. (2)

Neželezné kovy

Pro řezání neželezných kovů jako titan, hliník, nikl a měď CO₂ laserem platí určitá omezení. Proces řezání je méně efektivní než u ocelí. Neželezné kovy mají silný sklon k oxidaci a tvorbě otřepů, někdy je při řezání nutná vakuová atmosféra. K řezání plynů silně reaktivních s kyslíkem je nutné použít ochranný přídavný inertní plyn (argon). (2)

Řezná rychlost u neželezných kovů je nižší než u ocelí v důsledku vyšší tepelné vodivosti a reflektivity a nižší účinnosti oxidační reakce při řezání. (2)

Z uvedených neželezných kovů může být pouze titan řezán s obdobnou účinností jako nelegované oceli, protože reaguje skoro stejně jako oceli, i v jeho případě je však nutné použít argonovou ochrannou atmosféru, protože je náchylný na tvorbu výrazné oxidické vrstvy. (2)

Hliník a jeho slitiny se doporučuje řezat až po vytvoření anodové vrstvy, anodizovaný povrch umožňuje řezání hliníku až o 30% rychleji. (2)

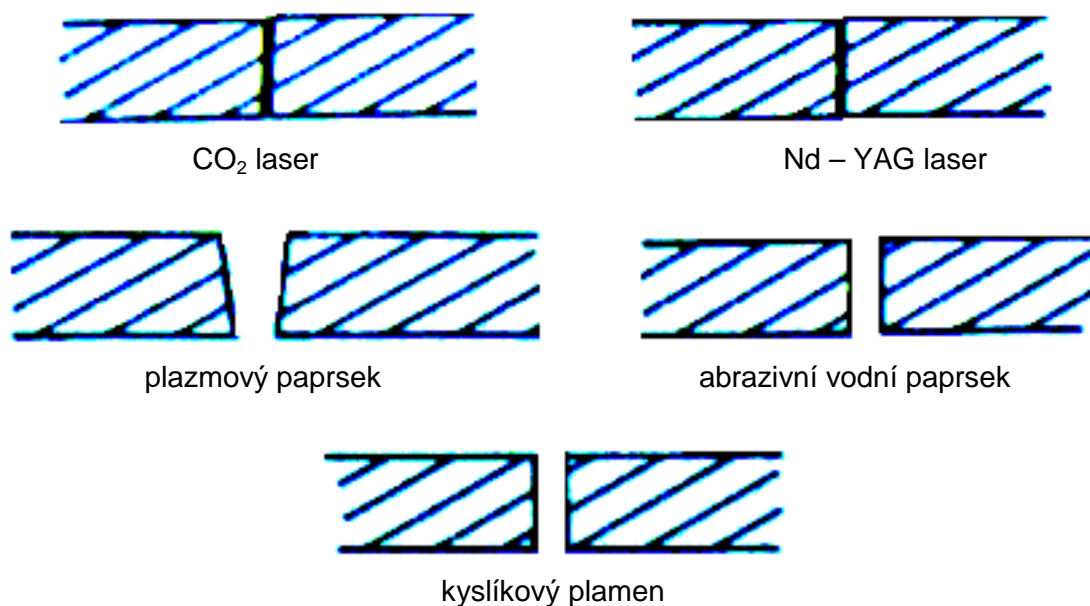
1.6 Porovnání řezání CO₂ laserem s jinými technologiemi

Laserové opracování je rychle a snadno regulovatelný proces a dnes patří k nejvyužívanějším technologiím zpracování materiálů pro svou flexibilitu a univerzálnost. V obrábění posouvá hranice možností opracování těžkoobrobitelných materiálů. (2)

Základní kvalitativní přednosti ve srovnání s jinými technologiemi lze shrnout do následujících bodů: (2)

- extrémní koncentrace výkonu na plochu, vysoká hustota energie a výkonu,
- jednoduchá regulace výkonu laseru a jeho energetického účinku na materiál,
- lehké ovládání paprsku,
- žádné opotřebení nástroje,
- nevzniká RTG záření v interakci s jinými látkami,
- není potřeba vakuum.

Mezi základní nevýhody patří finanční náročnost při zavádění do výroby, náklady na laser však pokrývají pouze 15 až 20% celkově nutných nákladů na laserové pracoviště. (2)



Obr. 1.9 Porovnání řezné spáry pro různé technologie (2)

Tab. 1.3 Kvalitativní porovnání čtyř alternativních technologií řezání/dělení materiálů s CO₂ laserem (2)

	Nd - YAG	PLAZMA	AWJ	KYSLÍKOVÝ PLAMEN
Kapitálové náklady	P	D	P	VD
Provozní náklady	P	P	P	D
KOVOVÉ MATERIÁLY				
Rychlost	Š	D	VŠ	Š
Kvalita řezné spáry	P ÷ D	VŠ	VD	Š
Maximální tloušťka	P ÷ D	VD	VD	VD
HAZ	P ÷ D	VŠ	VD	Š
Šířka zářezu	P	VŠ	VŠ	VŠ
NEKOVOVÉ MATERIÁLY				
KERAMIKA				
Rychlost	Š	N/A	Š	N/A
Kvalita řezné spáry	P ÷ D	N/A	D	N/A
Maximální tloušťka	P ÷ D	N/A	VD	N/A
Šířka zářezu	P ÷ D	N/A	Š	N/A
POLYMERY				
Rychlost	N/A	N/A	P	N/A
Kvalita řezné spáry	N/A	N/A	P	N/A
Maximální tloušťka	N/A	N/A	D	N/A
Šířka zářezu	N/A	N/A	Š	N/A

Vysvětlivky: N/A – nepoužitelné, VD – velmi dobré, D – dobré, P – podobné (stejně), Š – špatné, VŠ – velmi špatné

2 PŘEDSTAVENÍ FIRMY NTS PROMETAL MACHINING



Obr. 2.1 Sídlo firmy (8)

Laser *Bystronic Bystar 3015* s výkonem $4\,000\text{ W}$ má ve svém strojovém parku společnost *NTS Prometal Machining, s. r. o.*, která byla založena v r. 1997 jako *Prometal s. r. o.*, v současnosti je 100% vlastníkem holandská společnost *NTS-Group*. *NTS Prometal* má v dnešní době 100 zaměstnanců a roční obrát přesahuje 5 mil. €. Ubírá se směrem výroby částí strojů a technologických zařízení podle výkresové dokumentace dodané zákazníkem.

Firma sídlí v jihovýchodní části České republiky, ve městě Slavičín ve Zlínském kraji. Alokace byla zvolena z důvodu tradičně silného zastoupení strojírenské výroby v tomto regionu s ohledem na dostupnost a odbornost zaměstnanců.

NTS Prometal disponuje širokým spektrem výrobních aktivit v procesu obrábění kovových a nekovových materiálů, zpracování plechových dílů, povrchových úprav kovů a montáže sestav. Začátkem října 2007 byla navíc uvedena do provozu kompletní technologická linka pro nanášení práškových plastů a pracoviště pro nanášení kapalných nátěrových hmot. Tyto technologie jsou vhodné pro nanášení barev na dílce vyrobené z nejrůznějších druhů materiálů až do rozměrů $1000 \times 1600 \times 3000\text{ mm}$ a do hmotnosti 150 kg .

Výraznou předností oproti konkurenci je komplexní řešení požadavků zákazníka na jednom místě. Firma je zaměřena na malosériovou produkci. Optimální velikost výrobní dávky se pohybuje mezi desítkami až stovkami kusů.

NTS Prometal je již od svého založení v roce 1997 budován a řízen dle západoevropských standardů, strojový park (tab. 2.1) je navržen pro maximální univerzálnost a flexibilitu s CNC obráběcími stroji.

Až 90% veškeré produkce *NTS Prometal* je určeno na export, především do Holandska, Belgie, Německa a Skandinávie.

Ve spolupráci s konstrukčním oddělením firma nabízí komplexní realizaci strojního zařízení či jeho částí, modulů a podsestav od úvodního

zpracování projektu přes technologickou expertízu a výrobu až po uvedení zařízení do provozu.

(8)

Tab. 2.1 Přehled strojového parku NTS Prometal Machining (8)

Technologie	Stroj	Počet
Frézování	Agie - EXCELLENCE 2	1
	CNC frézka FGS 40 CNC P - 4 osy	1
	CNC frézka MAS MCV 750 A	1
	CNC frézka FNG 20 CNC E	1
	CNC frézka MAZAK VARIACIS 630 5X	1
	CNC frézovací centrum MCFV 1060 LR	3
	Nástrojařská frézka FN 20 s digit. Odměř.	1
	Univ. Fréz. Stroj FGS 32/40 s digit. Odměř.	1
Soustružení	CNC lathe MAZAK NEXUS 100	1
	CNC soustruh MAS MASTURN 50	1
	CNC soustruh OKUMA typ LB 300/M/500	1
Čištění dílců	Ultrasonic cleaning room	1
Dělení materiálů	CNC pásová pila PP 302A	1
	Kotoučová pila PERFECT 250	1
	Pásová pila PILOUS	1
Kontrola	CNC měřicí stroj Mitutoyo EURO C-7106	1
Broušení	Bruska na kulato BUB 32/1000	1
	Bruska na plochy BRH 40A	1
	Bruska na plochy JUMAC-JM	1
Zámečnické práce	Vrtačka V 20B	5
	Vrtačka VS 20B	1
Zpracování plechů	Laser BYSTRONIC BYSTAR 3015	1
	Ohraňovací lis AMADA HFBO 100/3	1
	SAFAN SMK-P32-1600 TS 1	1
	Zalisování matic 618 Heager Press	1
Svařování plechů	Bodová svářečka Schlatter SELECTA 1	1
	MIG - MAG, TIG, ocel, nerez, hliník	4
Práškové lakování	Prášková lakovací linka	1

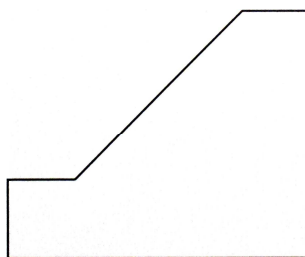
3 ROZBOR SOUČÁSTKOVÉ ZÁKLADNY

Na laserovém pracovišti NTS Prometal se vyrábějí různé součástky a většina zakázek je do 100 kusů. Sortiment výroby se proto z velké části neustále obměňuje, rozbor aktuálních součástek však lze zobecnit i dlouhodobě a rozdělit dle 3 základních hledisek:

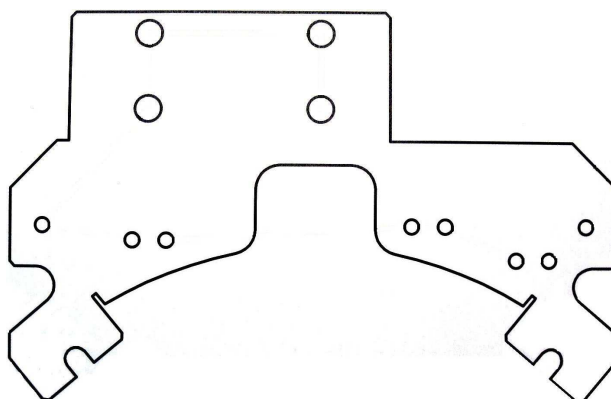
- 1) tvar,
- 2) materiál,
- 3) tloušťka.

3.1 Tvarové hledisko

Z hlediska tvarové složitosti lze na laseru řezat při dodržení pravidel (např. minimální vzdálenost mezi jednotlivými řezy, tepelně ovlivněné oblasti, stabilita konstrukce atd.) řezat různé tvary od naprosto jednoduchých (obr. 3.1 a 3.5) až po složité (obr. 3.2).

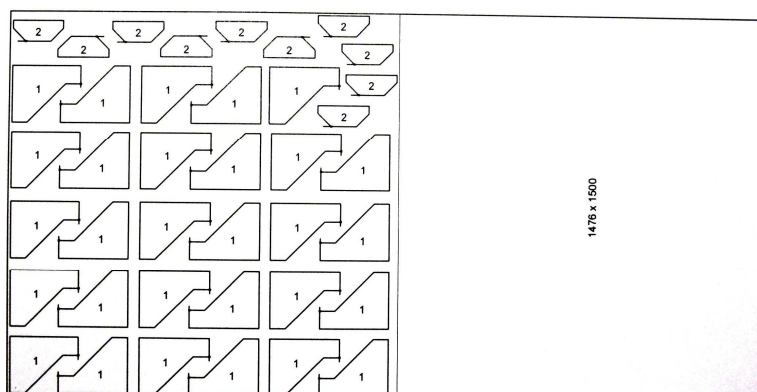


Obr. 3.1 Tvarově jednoduchý dílec z konstrukční oceli 1.0221 tloušťky 20 mm



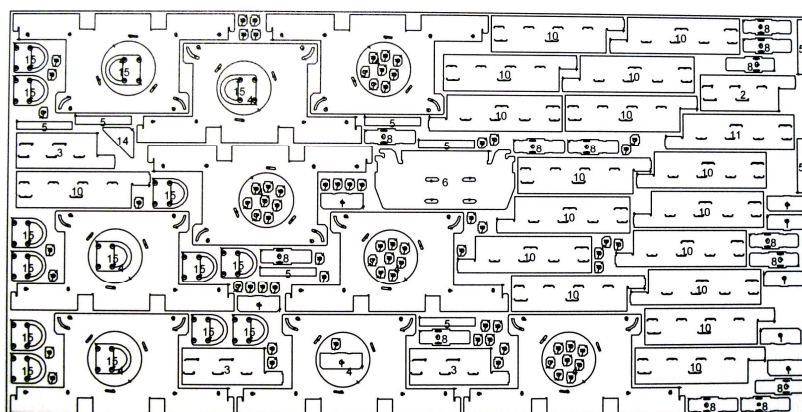
Obr. 3.2 Tvarově složitý dílec z nerez oceli 1.4301 tloušťky 1 mm

Nejvíce tvůrčí činností technologa je v tomto případě tvorba nástřihových plánů. Cílem je maximální využití materiálu polotovaru (plechu) s minimálním procentem odpadu. Princip rozmístování jednotlivých dílců je patrný z obr. 3.3. Tento příklad navíc znázorňuje i další problém. Často totiž dochází k situacím, kdy z různých důvodů není možno využít celý formát plechu, proto je z ekonomických důvodů snahou technologa tvorba takového rozvržení, aby nevyužitý zbytek plechu měl tvar, který bude dále využitelný i jindy.



Obr. 3.3 Princip skládání dílců – tvorba nástřihového plánu

Vzhledem k malým objemům výrobních dávek je většinou úkolem zaplnit tabuli plechu nejen jedním druhem součástky, ale zpravidla několika, reálně např. 10 až 15. Nástřihový plán pak vypadá jako na obr. 3.4.

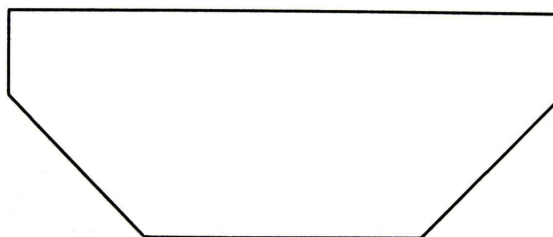


Obr. 3.4 Nástřihový plán pro 12 různých druhů součástek

3.2 Materiálové hledisko

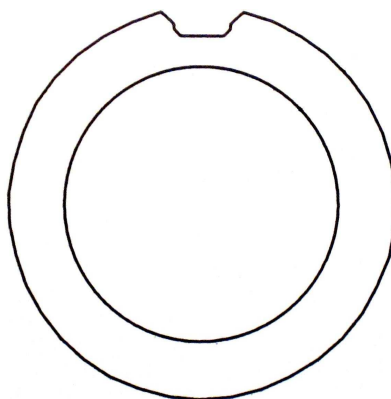
Specifikaci materiálů obrobitelných na laseru *Bystronic Bystar 3015* se věnuje kapitola 1.5 a 4.3 podrobněji, uvedme si tedy příklady zástupců všech 3 jednotlivých druhů materiálů:

- a) **Konstrukční ocel** – jediný materiál, který je možné při nižších nárocích na kvalitu řezat kyslíkem. Řezné hrany jsou však lehce oxidovány. Legující přísady zvyšují obtížnost řezání, vysoce legované oceli je nutné řezat dusíkem. Čím více je v oceli uhlíku, tím více je řezací hrana zakalená a silněji se opalují špičaté rohy. Součástky z konstrukční oceli jsou uvedeny na obr. 3.1 a 3.5.



Obr. 3.5 Dílec z konstrukční oceli 1.0221 tloušťky 20 mm

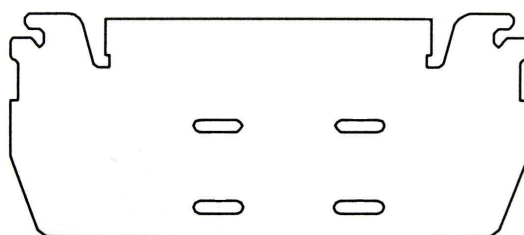
- b) **Nerez ocel** – součástky z oceli odolné proti korozi a kyselinám se řezou výhradně dusíkem, aby se dosáhlo řezných hran bez oxidů a otřepů. Z nerez oceli je vyráběna součástka na obr. 3.2 (legovaná ušlechtilá nerezavějící ocel 1.4301)
- c) **Hliníková slitina** – hliníkové slitiny se stejně jako nerez ocel řezou dusíkem, výjimečně se používá pro zapichování do tlustších desek také kyslík. Hliník je vysoce odrazivý materiál, což může zkracovat životnost optiky, proto je nutné v tomto případě speciálně kontrolovat výrobní proces. Čím měkčí a čistší hliníková slitina je, tím obtížněji se řeže, protože už při malých tloušťkách plechu vzniká otřep. Hliníkový dílec je znázorněn na obr. 3.6.



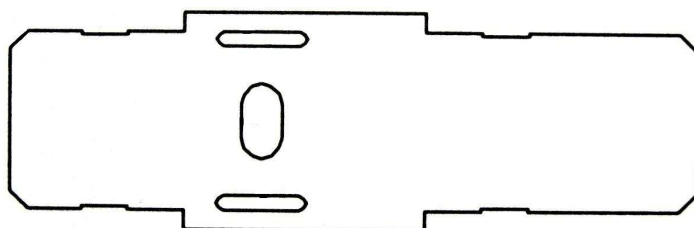
Obr. 3.6 Dílec ze slitiny AlMg3 tloušťky 1,5 mm

3.3 Tloušťkové hledisko

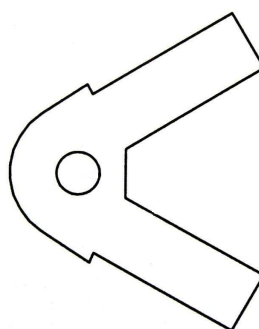
Rozsah tlouštěk plechů obrobitelných na laseru *Bystronic Bystar 3015* je 0,5 až 20 mm, řezatelnost z hlediska tloušťky a druhu materiálu je vysvětlena v kapitole 1.5.3. S rostoucí tloušťkou výrazně roste řezný čas, spotřeba řezného plynu, zhoršuje se kvalita řezu a rostou náklady. V současnosti jsou v NTS Prometal vyráběny součástky z plechů tlouštěk 1 mm (obr. 3.2), 1,5 mm (obr. 3.6), 5 mm (obr. 3.7, 3.8 a 3.9) a 20 mm (obr. 3.1 a 3.5).



Obr. 3.7 Dílec z konstrukční oceli 1.0221 tloušťky 5 mm



Obr. 3.8 Dílec z konstrukční oceli 1.0221 tloušťky 5 mm



Obr. 3.9 Dílec z konstrukční oceli 1.0221 tloušťky 5 mm

3.4 Formáty plechů

Vzhledem k fyzickým parametrům laseru *Bystronic Bystar 3015*, které jsou kompletně uvedeny v kapitole 5, resp. v příloze 1, má maximální použitelný formát plechu rozměry 3000 x 1500 mm. Ze zkušeností firmy s provozem laseru vyplývá vymezení 10 mm okrajů po obvodu každé plechové tabule, teoreticky možná maximální velikost jediné součástky má tedy rozměry 2980 x 1480 mm. Další formáty jsou 2500 x 1250 mm a 2000 x 1000 mm. Tyto tři uvedené formáty tabulí plechu tvoří základní používané rozměrové druhy plechů. Vzhledem k charakteru výroby, která je převážně kusová a výrobní dávky mají velmi malé objemy, je používaných formátů mnohem více a nelze je shrnout do přehledného seznamu. To plyne ze snahy o maximální využití materiálu ve formě různých odřezků a zbytků.

3.5 Výpočet plochy základních formátů plechů

Z výše uvedených rozměrů základních používaných formátů plechových tabulí se vypočítají jejich plochy pomocí vzorce 3.1.

$$S_T = a \cdot b \quad (3.1)$$

Tab. 3.1 Tabulka vypočítaných hodnot

	Rozměry formátu (a x b) [mm]	Vypočítané veličiny	Vypočítané hodnoty [mm ²]
1.	3000 x 1500	S _{T1}	4,5.10 ⁶
2.	2500 x 1250	S _{T2}	3,125.10 ⁶
3.	2000 x 1000	S _{T3}	2.10 ⁶

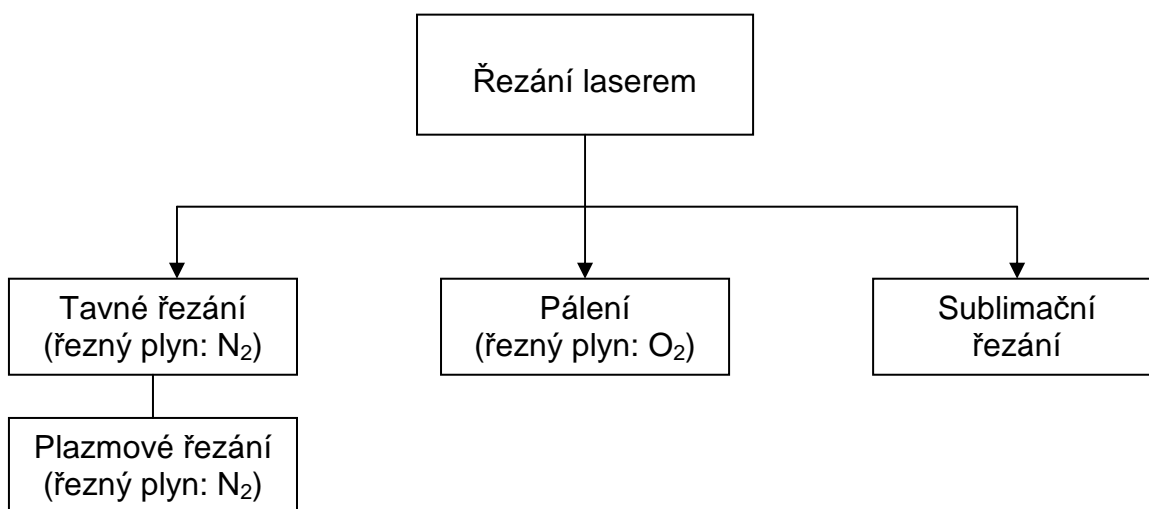
4 TECHNOLOGIČNOST TYPOVÝCH PŘEDSTAVITELŮ

4.1 Postupy laserového řezání

Jedná se o vysvětlení řezných postupů, které se uplatňují na CO₂ laseru *Bystronic Bystar 3015* ve firmě NTS Prometal Machining, s. r. o.

Oblasti laserového řezání:

Řezání laserem CO₂ lze rozdělit do tří hlavních oblastí.

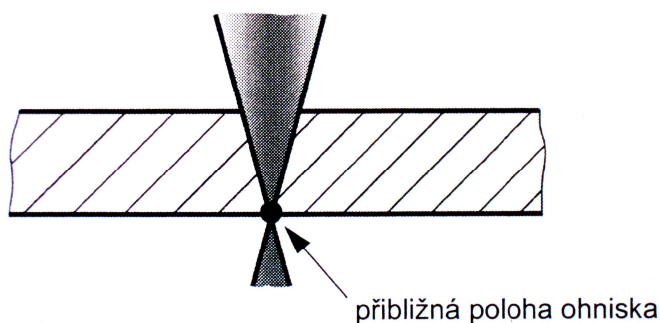


Obr. 4.1 Postupy laserového řezání (10)

4.1.1 Tavné laserové řezání

Při tomto způsobu řezání dochází k lokálnímu natavení obrobku a vyhnání taveniny proudem plynu N₂. Tento inertní, vysoce čistý řezací plyn (N₂), který je k laserovému paprsku přiváděn, se na samotném řezném procesu řezání sám nepodílí, ale pouze vyžene materiál obrobku z řezací spáry. Hovoříme o tavném řezání, protože pohyb taveniny probíhá výlučně v tekuté fázi. (10)

Tavné řezání laserem je určeno k řezání železných materiálů a je vhodné k výrobě řezných hran bez oxidů. (10)



Obr. 4.2 Tavné řezání (10)

Tab. 4.1 Vlastnosti tavného laserového řezání (10)

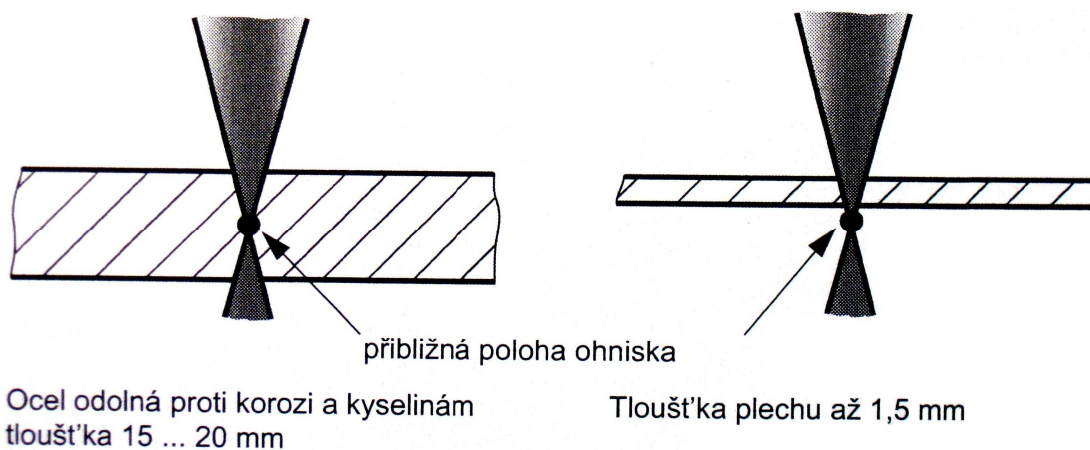
Řezný plyn	dusík nebo argon
Výkon laseru	80 až 100% max. výkonu
Tlak plynu	10 až 20 barů
Poloha ohniska	přibližně na spodní hraně desky

4.1.2 Řezání v oblasti plazmy

Jedná se o způsob tavného řezání, kdy změnou řezných parametrů dochází ke vzniku jasného světla (podobně jako v elektrickém oblouku). Řezným plynem je zde opět dusík (N_2). (10)

Tímto způsobem je možné řezat větší rychlostí než u laserového tavného řezání plechy do tloušťky 1,5 mm a zároveň řezání v oblasti plazmy umožňuje řezat takové tloušťky, které jinak řezat nelze (např. korozivzdorná ocel tloušťky 15 až 20 mm). Stinnou stránkou je však v porovnání s ostatními způsoby významně zvýšená hrubost řezu. (10)

Řezání v oblasti plazmy vytváří řeznou hranu bez oxidů. (10)



Obr. 4.3 Plazmové řezání (10)

Tab. 4.2 Vlastnosti řezání v oblasti plazmy (10)

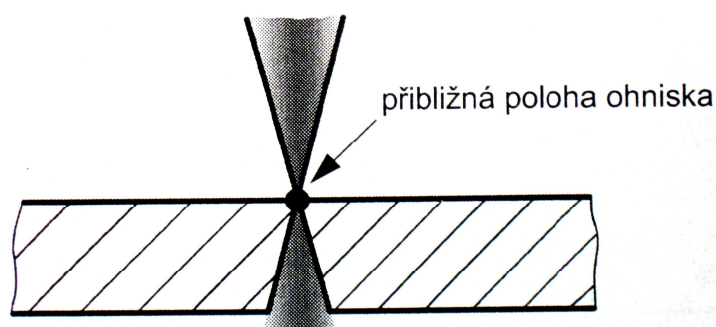
Jasně světlo v řezné spáře při řezání.	
Řezný plyn	dusík
Posuv	až o 40% větší než při normálním tavném laserovém řezání
Výkon laseru	maximální
Kvalita řezu	zvýšená hrubost (plazmový řez)

4.1.3 Laserové pálení

Na rozdíl od laserového tavného řezání je zde jako řezací plyn použit kyslík (O_2). Tato technologie slouží k řezání konstrukčních ocelí. Protože při interakci rozpáleného kovu s kyslíkem dochází k dodatečnému zahřívání řezaného materiálu, lze tohoto účinku využít k dosažení rychlostí, které jsou u

tloušťky řezaného materiálu 6 mm a více mnohonásobně vyšší než u tavného řezání. (10)

Nejvýraznější výhodou laserového pálení je nesrovnatelně menší energetická náročnost a mnohonásobně vyšší rychlost řezání v porovnání s řezáním dusíkem. Tato metoda je však kvůli značnému ohřevu řezaného materiálu a riziku odtavení prakticky nepoužitelná při řezání jemných obrysů a ostrých hran. Přívod tepla lze omezit pulsním provozem namísto kontinuálního. (10)



Obr. 4.4 Laserové pálení (10)

Tab. 4.3 Vlastnosti laserového pálení (10)

Řezný plyn	kyslík
Výkon laseru	25 až 80% max. výkonu
Tlak plynu	0,5 až 5 barů
Poloha ohniska	přibližně na horní hraně desky

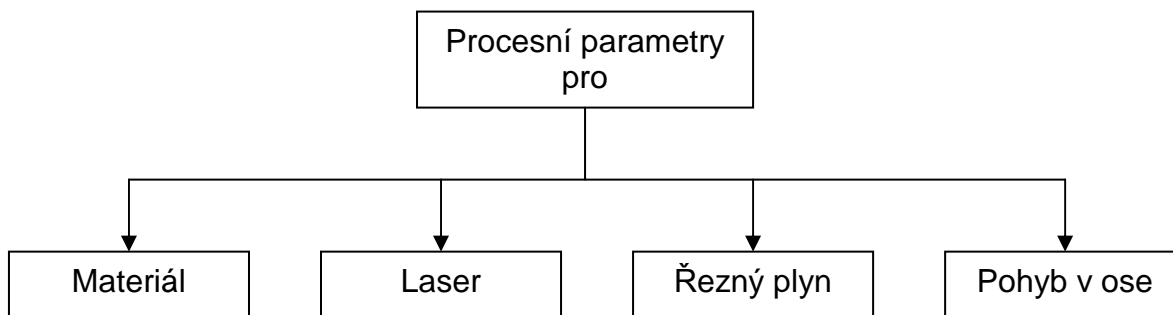
4.1.4 Sublimační laserové řezání

Při tomto způsobu řezání se materiál z řezné spáry přímo odpařuje, aniž by předtím dosáhl kapalného stavu. (10)

Metoda laserového sublimačního řezání je však uvedena pouze pro úplnost, protože laserové řezací zařízení *Bystronic Bystar 3015* ve firmě NTS Prometal Machining, s. r. o. tento způsob řezání neumožňuje. (10)

4.2 Řezací proces

Pojmem řezací (obráběcí) proces se rozumí vzájemná interakce mezi laserovým paprskem, řezným plynem a obráběným materiálem.



Obr. 4.5 Procesní parametry (10)

Zóna, v níž se řezný proces odehrává, se označuje jako řezací čelo nebo čelo řezu. Výkon laserového paprsku, který působí na čele řezu, musí obráběný materiál zahřát na teplotu potřebnou k fázové přeměně materiálu na taveninu a páru. (10)

Čelo řezu je vzhledem k povrchu obráběné plechové plotny téměř svislá plocha, která se při adsorpci laserového záření zahřívá a natavuje. (10)

- Při *laserovém pálení* se tato tavná oblast dále zahřívá proudem kyslíku zaváděného do spáry téměř až na teplotu varu materiálu. Důsledkem je silné odpařování, které vede k odstraňování materiálu. Současně se zahříváním dochází k vyhánění nataveného materiálu řezným plynem a zároveň k ochraně řezné spáry před oxidací. (10)
- Při *laserovém tavném řezání* dochází k vyhánění taveniny řezným plynem a k ochraně řezné spáry před oxidací. (10)

Roztavená zóna se šíří dále ve směru řezání a tím vzniká plynulá řezná spára. (10)

Analýzou procesů, které se odehrávají v oblasti řezu, se zjišťují důležité údaje o laserovém řezání. Tímto způsobem lze např. odhadnout rychlost řezání či vysvětlit vznik charakteristických rýh. (10)

4.2.1 Parametry plynu

- Druh plynu
- Čistota plynu
- Tlak plynu
- Průměr trysky
- Geometrie trysky

Tlak plynu a geometrie trysky mají zásadní vliv na hrubost řezných hran a tvoření otřepů. (10)

4.2.2 Spotřeba řezného plynu

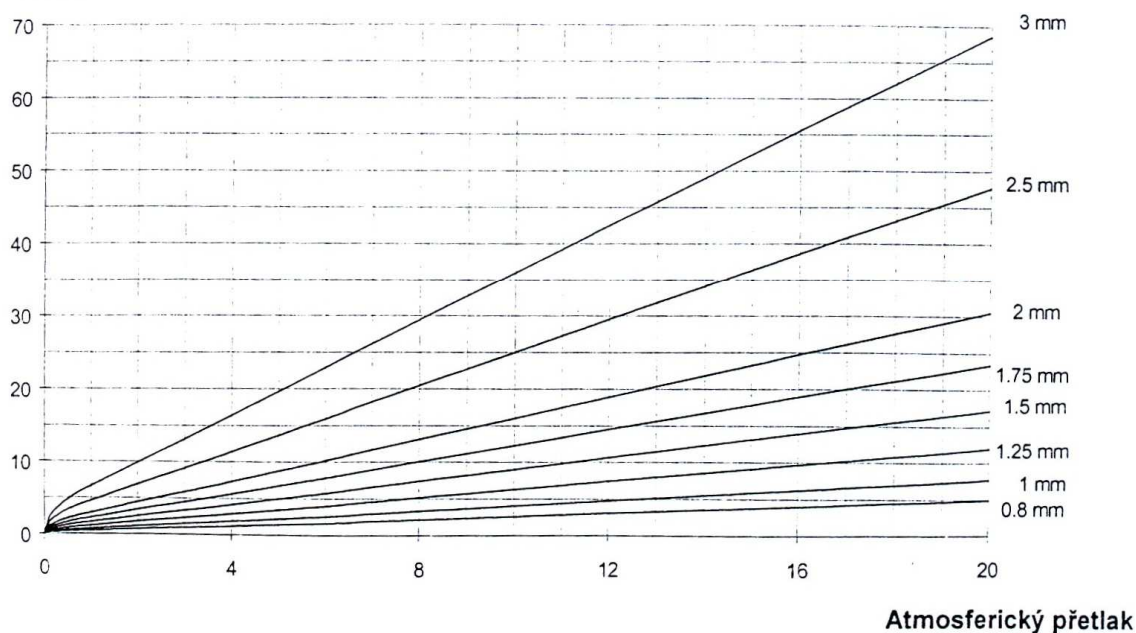
Spotřeba řezného plynu je závislá na průměru trysky a na tlaku plynu. (10)

- Konvenční řezací tryska vykazuje kruhový, kónický probíhající otvor.
- Je nutno dbát na co nejmenší vzdálenost mezi otvorem trysky a povrchem obrobku. Čím menší je tato vzdálenost, tím větší je podíl proudu plynu, který skutečně vstupuje do řezací spáry. Obvyklé vzdálenosti jsou 0,5 až 1,5 mm.

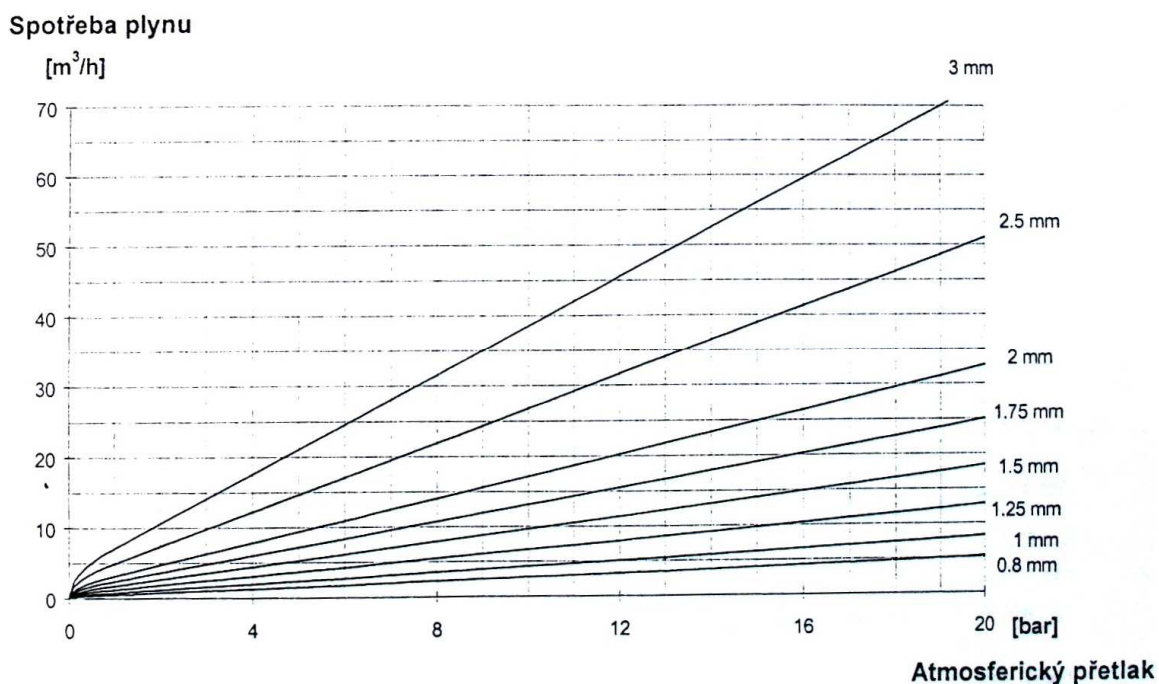
Následující obrázky znázorňují grafy závislosti spotřeby procesních plynů na atmosférickém přetlaku (v barech) pro různé tloušťky řezaného materiálu od 0,8 do 3 mm.

Spotřeba plynů

[m³/h]



Obr. 4.6 Spotřeba kyslíku (11)



Obr. 4.7 Spotřeba dusíku (11)

4.3 Specifikace obráběných materiálů

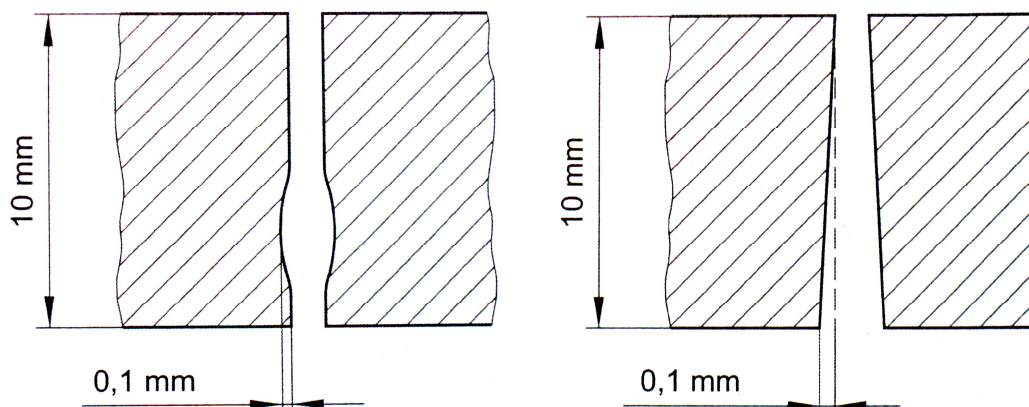
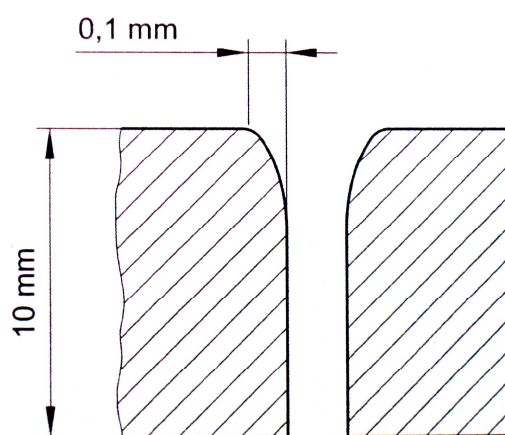
Veškeré údaje o technologii řezání na laseru *Bystronic Bystar 3015*, uvedené v této studii, se vztahují na materiály uvedené v tab. 4.4, které jsou zpracovávány firmou NTS Prometal Machining, s. r. o. (10)

Tab. 4.4 Obráběné materiály (10)

Konstrukční ocel	Tloušťka: 1 až 15 mm	St 37-2
	Tloušťka: 16 až 25 mm	RAEX 420MC
Ocel odolná proti korozi a kyselinám		X5CrNi 18 9
Hliník		AlMg 3

4.4 Pravoúhlost řezné plochy

Řezná spára při laserovém řezání neprobíhá přesně v pravém úhlu vůči rovině desky. U desek tloušťky 10 mm se může řezná rovina odchylovat maximálně o 0,1 mm. (10)

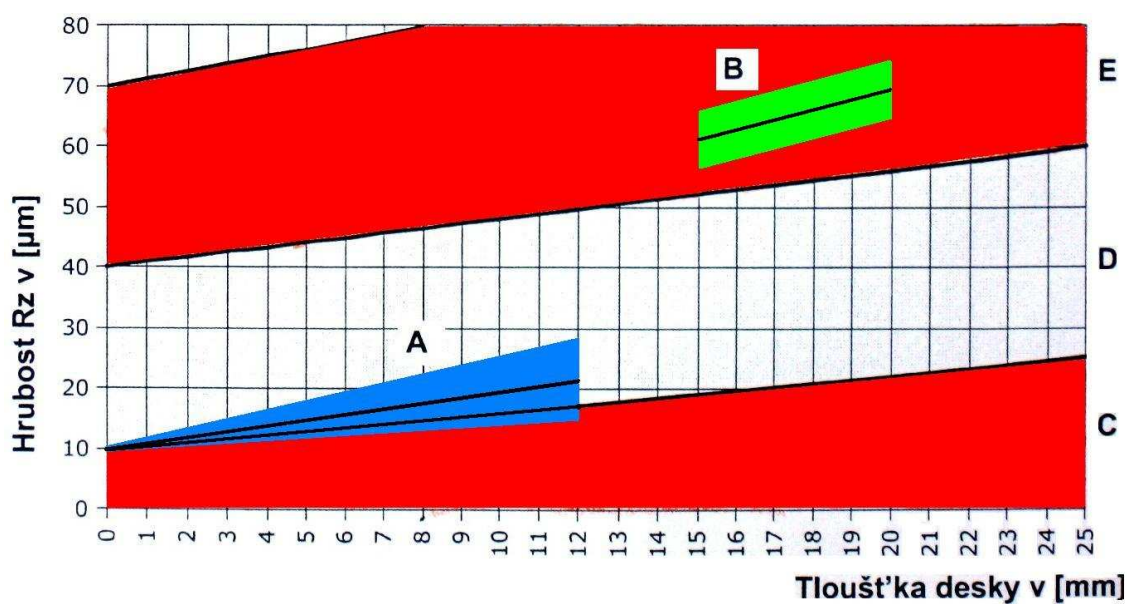
Obr. 4.8 Pravoúhlost při pálení s kyslíkem O₂ (10)Obr. 4.9 Pravoúhlost při tavném řezání s dusíkem N₂ (10)

Geometrie podle obr. 4.8 a 4.9 vznikají podle zvoleného řezného procesu a nelze je ovlivnit. (10)

Pravoúhlost při laserovém řezání je výrazně lepší než při plazmovém řezání a při pálení autogenem. (10)

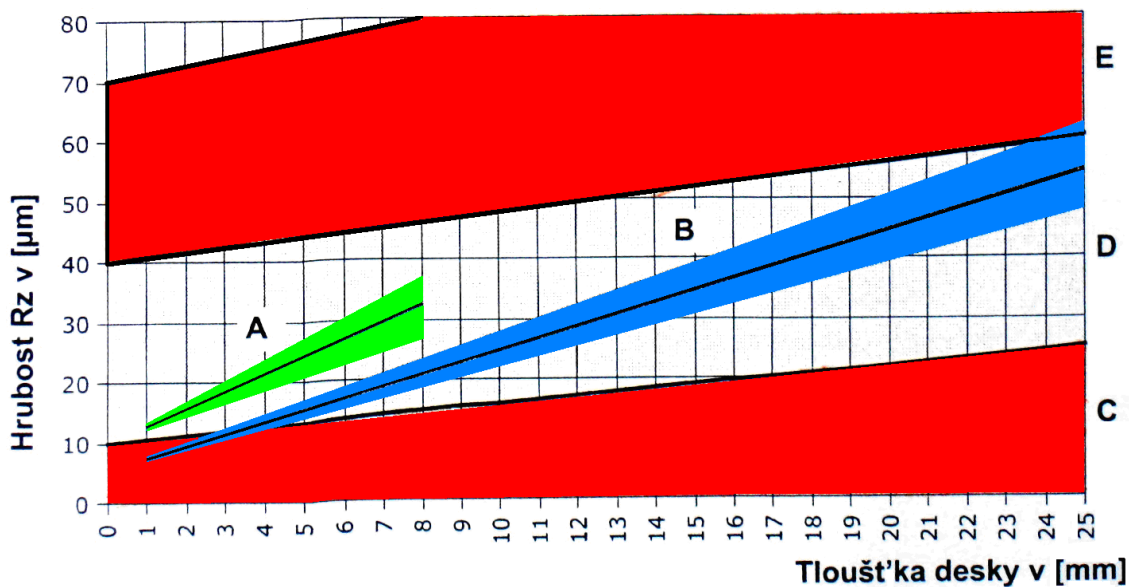
4.5 Hrubost řezné plochy

Obecně lze říci, že hrubost řezné plochy roste s rostoucí tloušťkou obráběné desky. Při laserovém řezání se dosahují hodnoty hrubosti podle DIN EN ISO 9013 toleranční třídy 2. Hrubost řezné plochy lze mírně korigovat řeznými parametry. Následující diagramy znázorňují přehled hodnot hrubosti *R_z*, které jsou dosahovány na laserovém zařízení *Bystronic Bystar 3015* s laserovým zdrojem 4000 W ve firmě NTS Prometal Machining (při použití jiného výkonu laseru se mohou lišit). (10)



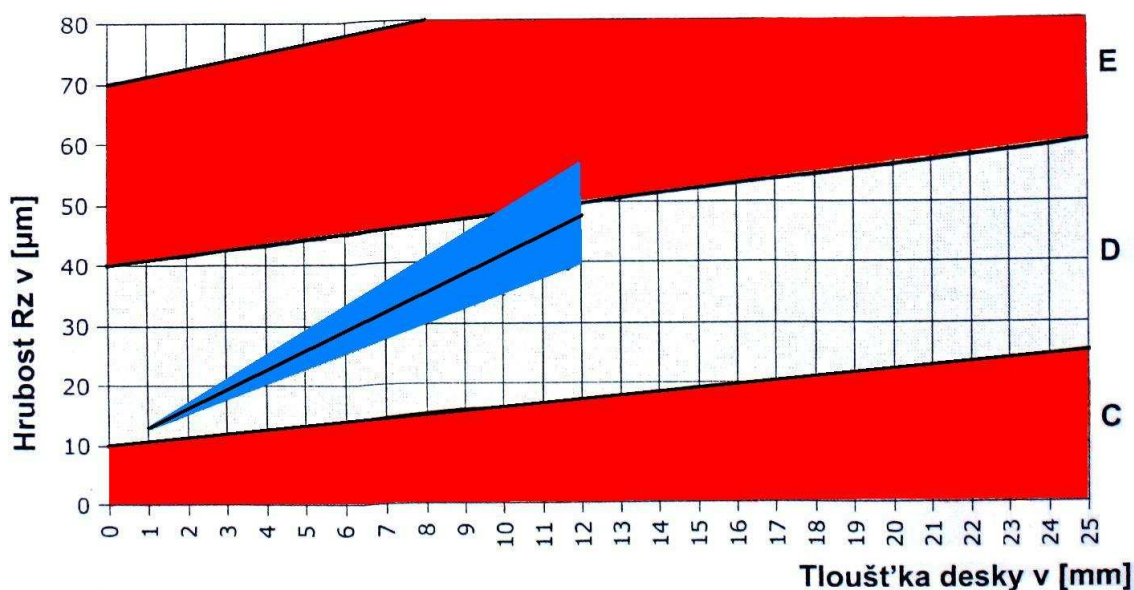
- A Ocel odolná proti korozi a kyselinám, kvalitní řez
- B Ocel odolná proti korozi a kyselinám, plazmový řez
- C DIN EN ISO 9013 toleranční třída 1
- D DIN EN ISO 9013 toleranční třída 2
- E DIN EN ISO 9013 toleranční třída 3

Obr. 4.10 Směrné hodnoty hrubosti pro ocel odolnou proti korozi a kyselinám (10)



- A Konstrukční ocel, řezný plyn dusík N₂
- B Konstrukční ocel, řezný plyn kyslík O₂
- C DIN EN ISO 9013 toleranční třída 1
- D DIN EN ISO 9013 toleranční třída 2
- E DIN EN ISO 9013 toleranční třída 3

Obr. 4.11 Směrné hodnoty hrubosti pro konstrukční ocel (10)



C DIN EN ISO 9013 toleranční třída 1

D DIN EN ISO 9013 toleranční třída 2

E DIN EN ISO 9013 toleranční třída 3

Obr. 4.12 Směrné hodnoty hrubosti pro hliník (10)

4.6 Rádiusy na obrysech

Jednou ze základních zásad návrhu součástí řezaných laserem jsou zaoblené obrysy a rohy, z čehož plynou tyto přednosti a výhody: (10)

- kratší výrobní časy,
- vyšší bezpečnost procesu,
- menší riziko poranění,
- opticky lepší dojem.

Cílem laserového řezání je vyhnout se špičatým obrysům, vyrobit je však lze.

Tab. 4.5 Směrné hodnoty pro minimální rádiusy v rozích (10)

Materiál	Řezný plyn	Tloušťka desky [mm]					
		... 4	5 ... 8	10 ... 12	15 ... 18	20	25
		Rádus [mm]					
Konstrukční ocel	Kyslík O_2	0,8	1	1,5	2	3	4
Nerez ocel	Dusík N_2	0,8	1,2	2	3	4	5
Hliník		0,8	1,5	2,5	4	-	-
Konstrukční ocel		0,8	1,5	-	-	-	-

Hodnoty rádiusů uvedené v tab. 4.5 jsou minimální předepsané, zvolit se mohou libovolně větší. Špičatý roh se uplatňuje v případech, kdy konstrukce nepřipouští rádius. (10)

Rádusy menší než 0,8 mm jsou z hlediska výroby téměř neuskutečnitelné, obtížnější než ostré rohy. (10)

4.7 Tloušťka plechu a řezná rychlost

Pokud to dovoluje stabilita, nejúčinnější úspory materiálu lze dosáhnout redukcí tloušťky plechové desky. To vede nejen k nižší hmotnosti, ale i k výraznému zkrácení času řezání a manipulace. (10)

Čas řezání s rostoucí tloušťkou materiálu dramaticky narůstá. Ve firmě NTS Prometal byly dle zkušeností s provozem laserového zařízení *Bystronic Bystar 3015* optimalizovány řezné rychlosti pro jednotlivé materiály a jejich tloušťky, které lze shrnout do tabulky 4.6.

Tab. 4.6 Řezné rychlosti

Tloušťka plechu [mm]	Materiál, řezný plyn a řezná rychlost [mm/min]			
	Konstrukční ocel	Konstrukční ocel	Nerez ocel	Hliník
	Řezný plyn			
	Kyslík O ₂	Dusík N ₂	Dusík N ₂	Dusík N ₂
	Řezná rychlost [mm/min]			
0,5	7 900	8 200	8 200	8 300
0,8	7 800	7 600	7 700	7 750
1	7 700	6 500	6 500	7 200
1,5	6 900	6 000	6 000	7 100
2	6 300	5 600	5 600	6 500
2,5	5 700	5 500	5 400	5 450
3	3 400	3 000	3 000	3 200
4	2 600	1 600	2 200	2 700
5	2 400	1 500	2 000	2 500
6	2 000	1 300	1 400	1 450
8	1 300	-	750	750
10	1 200	-	500	550
12	750	-	-	-
15	890	-	-	-
20	450	-	-	-

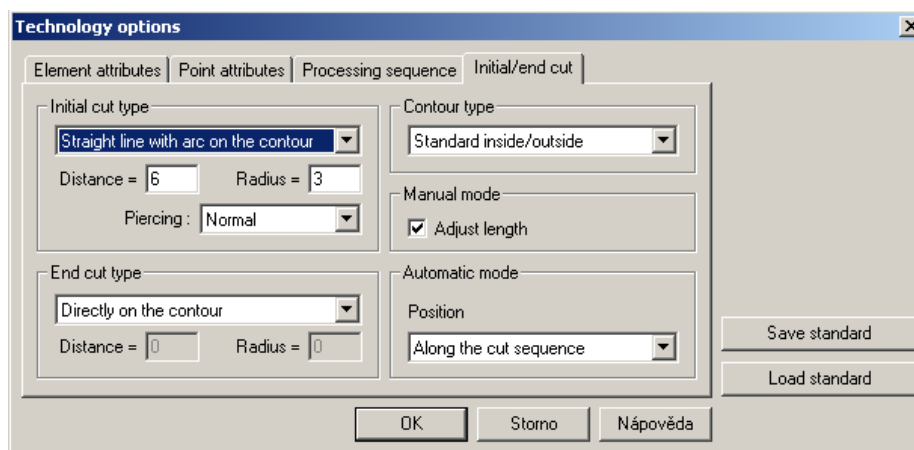
4.8 Návrh výroby konkrétního výpalku

V této kapitole si ukážeme návrh na výrobu 20 kusů složitějšího plechového dílce 4022 264 96831-A, výkres je v příloze 2 a Bywork order list v příloze 3, materiál legovaná ušlechtilá nerezavějící ocel 1.4301, v programovacím softwaru *Bysoft*. Součástí zadání zákazníků jsou v drtivé většině výkresy v elektronické podobě jako „dxf“ soubory, takže technolog do *Bysoftu* načte již hotovou „dxf“ konturu, kterou není třeba nijak upravovat.



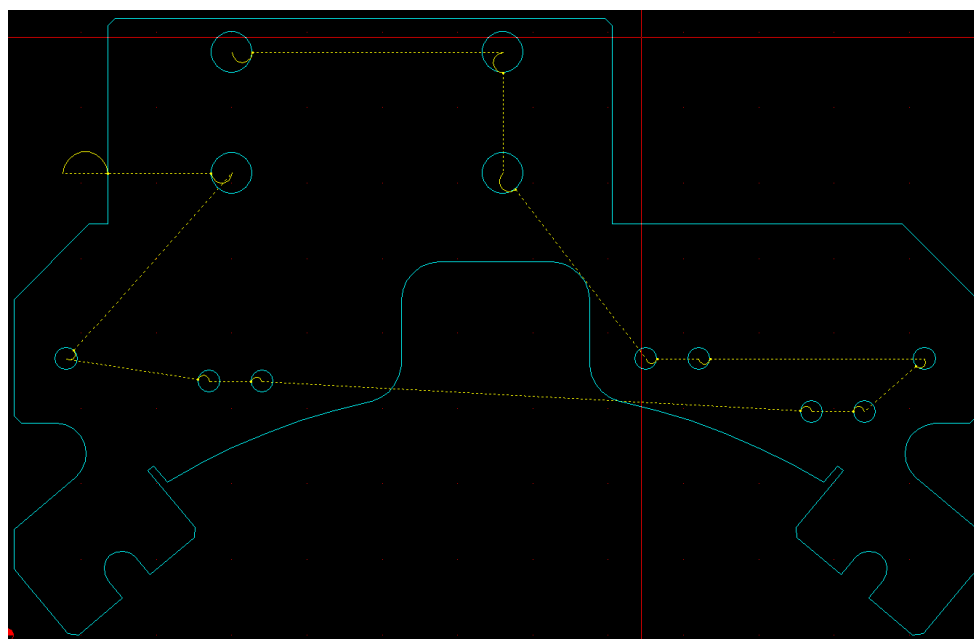
Obr. 4.13 Hlavní nabídka softwaru Bysoft

- 1) Provedeme načtení materiálu výpalku výběrem ze softwarové databáze.
- 2) Načteme externí „dxf“ soubor s konturou našeho dílce. Program umožňuje v této fázi i editaci. Vybereme konturu, která se má řezat, označením všech čar dílce.
- 3) V této fázi zvolíme způsob nájezdu paprsku na konturu rádiusem a ukončení řezu přímo na kontuře.



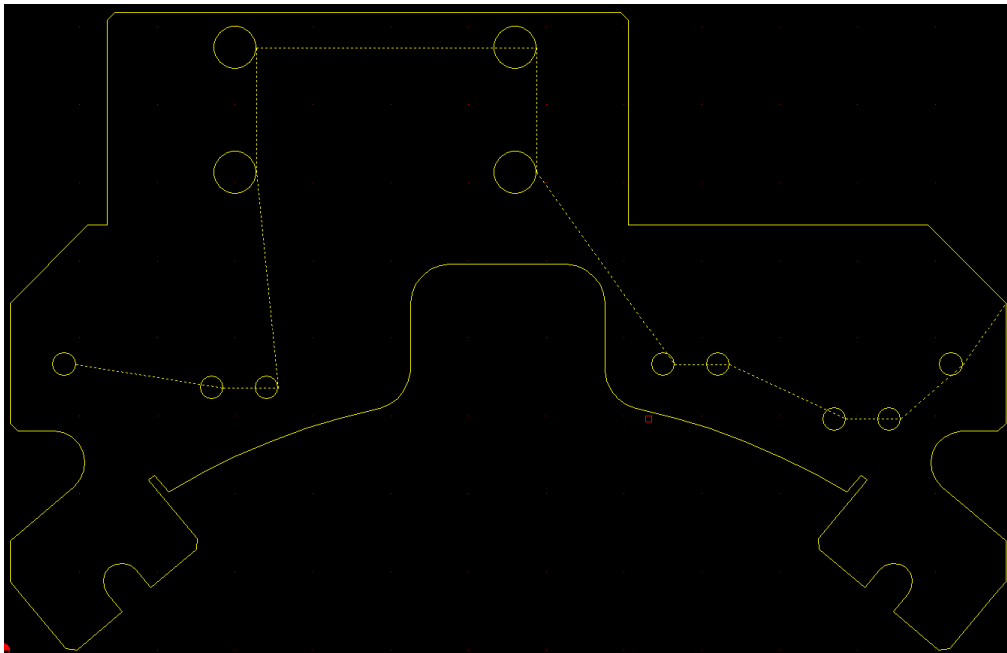
Obr. 4.14 Definice nájezdu a výjezdu paprsku

- 4) V dalším kroku necháme program automaticky navrhnout dráhu paprsku a vyhodnotíme, jestli je navrhované řešení správné, či nikoliv.



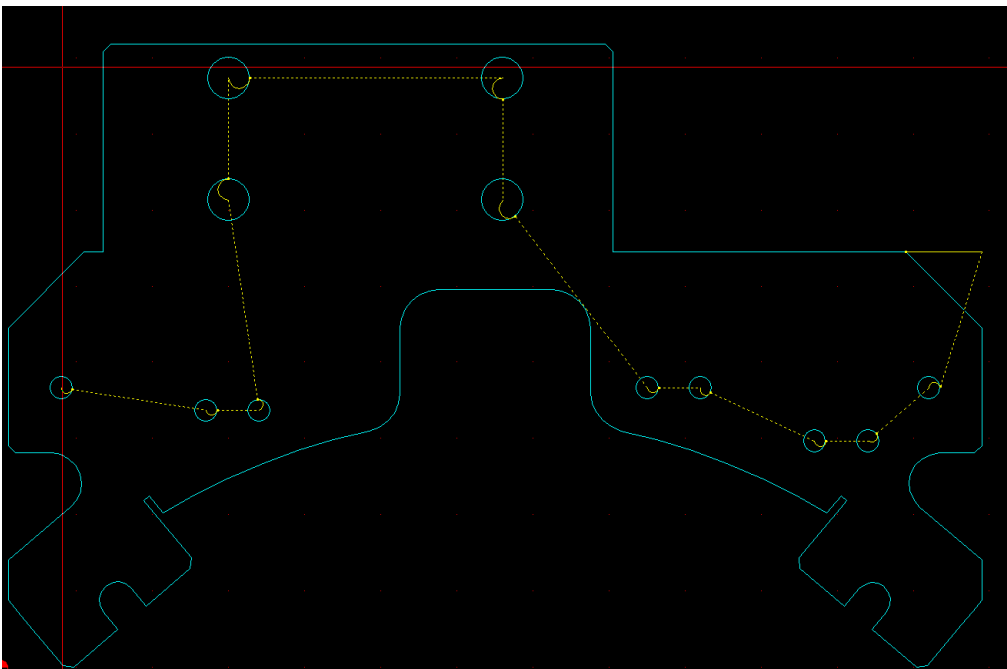
Obr. 4.15 Návrh dráhy paprsku - automaticky

- 5) Jelikož navrhované řešení se jeví jako nevhodné, upravíme dráhu ručně.



Obr. 4.16 Návrh dráhy paprsku – racionalizace

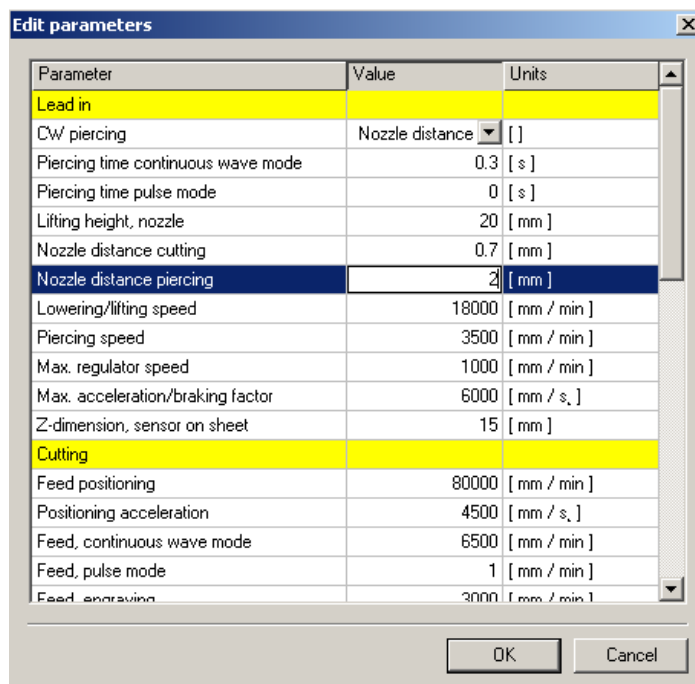
- 6) Racionalizujeme nájezd na vnější konturu plynule rovnoběžně ze vzdálenosti 10 mm, nájezdy na vnitřní kontury necháme rádiusem s parametry definovanými v bodě 3.



Obr. 4.17 Racionalizace nájezdu na vnější konturu

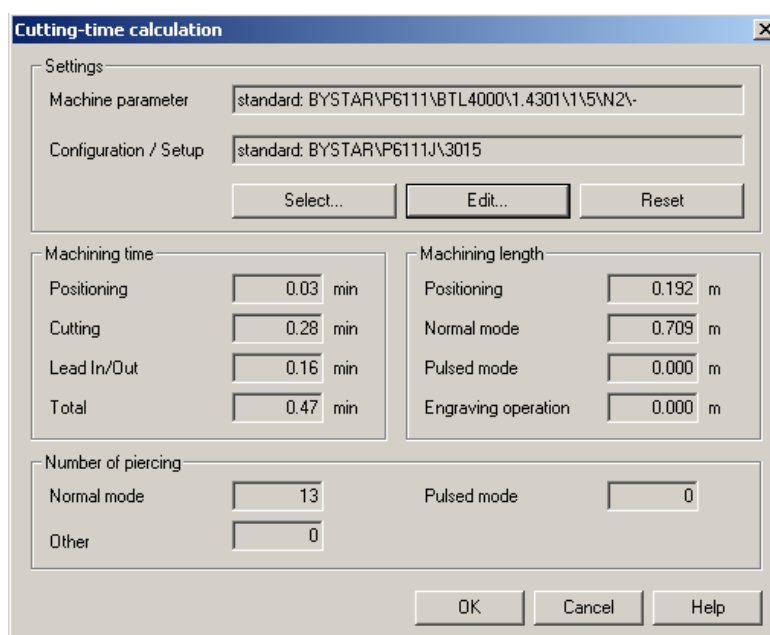
- 7) Po nadefinování dráhy paprsku načteme z databáze parametry stroje: typ stroje (*Bystar*), verze ovládání (P6111), materiál (1.4301) a tloušťka dílce (1 mm), řezná hlava (5), procesní plyn (N_2), typ obrábění (běžný).

- 8) Následuje konfigurace: typ stroje (*Bystar*), verze ovládání (P6111J), pracovní oblast (3015).
- 9) V další fázi je nutné zkontrolovat přednastavené řezné parametry, např. řeznou rychlost, vzdálenost laserové hubice od plechu atd.



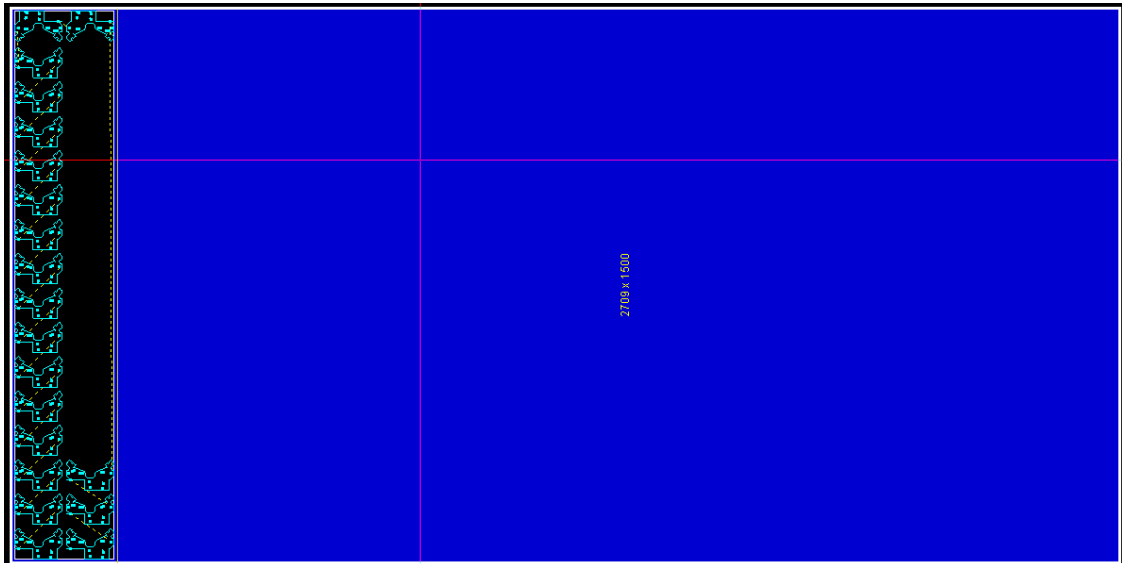
Obr. 4.18 Editace řezných parametrů

- 10) V následujícím kroku program provede kalkulaci času (posuv, řezný čas) a dráhy laseru.



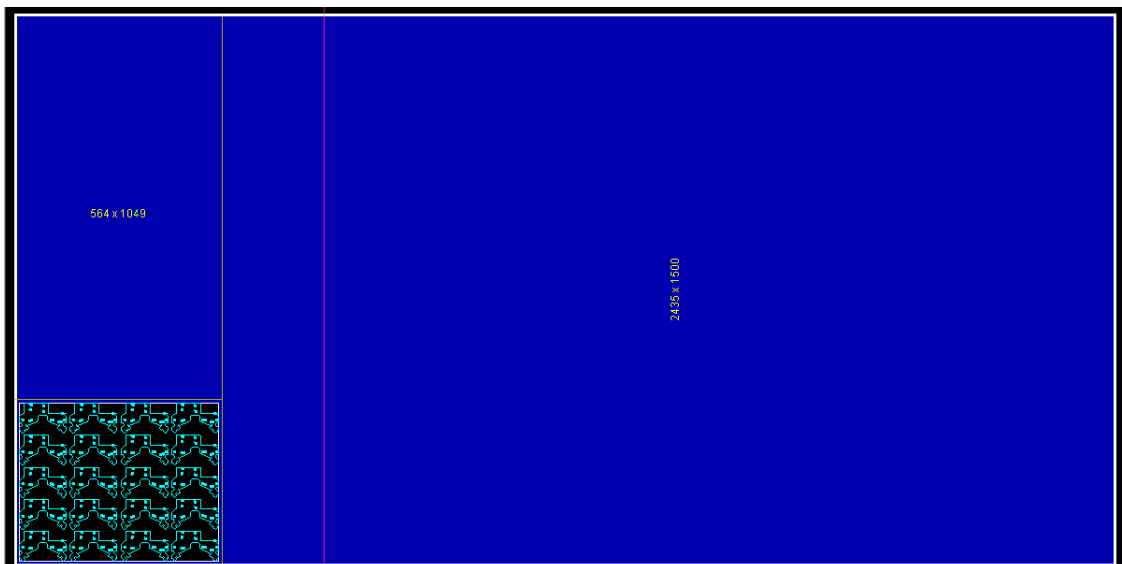
Obr. 4.19 Kalkulace řezných časů

- 11) Po uložení následuje načtení nástřihového plánu a automatického rozmístění zadaného počtu dílců (20 kusů) na danou plechovou tabuli, v tomto případě formát 3000 x 1500 mm.



Obr. 4.20 Rozmístění výpalků na plechovou tabuli – automaticky

- 12) Po posouzení automatického návrhu především z hlediska použitelnosti zbylého plechu je nutné rozmístění dílců optimalizovat.



Obr. 4.21 Rozmístění výpalků na plechovou tabuli – ruční optimalizace

- 13) V poslední fázi si necháme programem vystavit závěrečnou kalkulaci a vytvořený soubor je po uložení připraven k odeslání na laser.

Calculation									
Job		Settings							
Material	N1170 AISI304	Machine parameter							
Thickness	1	standard: BYSTAR\P6111\BTL4000\1.4301\1\5\N2\-							
Machine	Prometal	Configuration							
		standard: BYSTAR\P6111.J\3015							
<input type="button" value="Calculate"/>		<input type="button" value="Select..."/>		<input type="button" value="Edit"/>		<input type="button" value="Reset"/>			
Parameter Settings									
Sensor	Feedrate								
	Positioning	Normal mode	Pulsed mode						
Capacitive	80000.000	6500.000	1.000						
Job calculation									
Description	Cutting time					Number of piercing			
	Positioning ways	Cutting ways	Lead In/Out	Total	Normal mode	Pulsed mode	Other		
	0.67 min	5.82 min	3.26 min	9.75 min	261	0	1		
	7.815 m	15.683 m		23.498 m					
Plan calculation									
Plan No.	Cutting time					Number of piercing			
	Positioning ways	Cutting ways	Lead In/Out	Total	Normal mode	Pulsed mode	Other		
1	0.67 min	5.82 min	3.26 min	9.75 min	261	0	1		
	7.815 m	15.683 m		23.498 m					
Parts calculation									
Description	Cutting time					Number of piercing			
	Positioning ways	Cutting ways	Lead In/Out	Total	Normal mode	Pulsed mode	Other		
4022 264 95831-A	0.03 min	0.26 min	0.16 min	0.47 min	13	0	0		
	0.192 m	0.709 m		0.901 m					

Obr. 4.22 Závěrečná kalkulace

5 PROVOZNÍ NÁROČNOST POUŽITÍ STARŠÍHO TYPU STROJE

5.1 Konstrukční princip laserového zařízení *Bystronic Bystar 3015*

Nástrojem laserových strojů *Bystronic* je laserový paprsek, laser je pevně uchycen. Laserový paprsek je veden do zpracovávaného materiálu přes vychylovací zrcátka principem „plovoucí optiky“. Vychylovací zrcátka jsou pevně uchycena na osách stroje. To zajišťuje správné nastavení dráhy laserového paprsku po celou dobu cesty od rezonátoru do řezné hlavy. Pro případy pracovních chyb je paprsek chráněn před nebezpečnými nárazy z okolních zón. (11)



Obr. 5.1 Pohled na stroj ve standardní konfiguraci s rotačním podavačem umístěný ve výrobní hale NTS Prometal Machining, s. r. o.

5.2 Seznam a popis jednotlivých komponentů stroje

- **Rám stroje**

Robustní rám stroje se skládá ze strukturovaně vyrobených ocelových plechů a trubek. Rám stroje podpírá celou dráhu paprsku, která jde nosníky, vozíkem až do řezné hlavy. Vše je vyrobeno se speciální antivibrační charakteristikou se zřetelem na vysokou akceleraci jednotlivých pracovních os. (11)

Spodní část rámu stroje je rozdělena do dvou extrakčních komor. V extrakční komoře, nad kterou se zrovna nachází řezná hlava, je otevřen ventil a vzduch, který obsahuje nečistoty, je odsáván. (11)

Přenašeč zachycuje strusku a nečistoty propadávající skrze podpěrné rošty stolu a unáší je do připravených nádob. (11)

- **Pracovní stůl**

Stůl s výměnnými rošty se používá pro podpírání materiálů během plochého opracovávání. (11)

- **Rošty**

Rošty mohou být vyrobeny z rozličných materiálů. Měděné mříže nabízejí vysokou odolnost proti přehřívání. Struska se odstraňuje snadněji. Nicméně vysoká reflektivnost mědi může mít negativní vliv na tenké materiály s malými dírami (díry jsou nepřesné), nebo pokud se řeže kyslíkem (vytváření plazmy, přerušení paprsku). (11)

- **Nosník**

Nosník nese vozík. Zrcadlo v nosníku vychyluje laserový paprsek ve směru os nosníku. (11)

- **Vozík**

Vozík nese Z-osu. Zrcadlo v nosníku vychyluje laserový paprsek vertikálně dolů ve směru řezné hlavy. (11)

- **Z-osa**

Z-osa pohybuje řeznou hlavou ve vertikálním směru. Pohybuje řeznou hlavou nad řezaným materiálem a udržuje konstantní vzdálenost mezi tryskou a materiálem. (11)

- **Snímání**

Optimální kvalita závisí na konstantní vzdálenosti mezi tryskou a materiálem. Existují dva způsoby měření vzdálenosti: (11)

- Snímání přímým kontaktem s materiálem (mechanické). Takto se dá snímat vzdálenost na všech materiálech. Toto snímání se používá hlavně pro opracovávání trubek a materiálů, které nejsou elektricky vodivé. Vzdálenost se měří pomocí vysoce citlivého potenciometru.

- Kapacitní snímání je založeno na měření elektrické kapacity mezi tryskou a materiálem. Kapacitní snímání může být použito pouze pro ploché opracovávání u elektricky vodivých materiálů.

Pohybem Z-osy se mění vzdálenost mezi tryskou a materiálem a reguluje se podle nastavených hodnot. (11)

- **Řezná hlava**

Řezná hlava reprezentuje poslední část na dráze paprsku. Její čočky vedou laserový paprsek do ohniska a zabezpečují nezbytnou hustotu (intenzitu) energie na materiálu. Standardní dodávka obsahuje dvě řezné hlavy s ohniskovou vzdáleností 5" a 7½". (11)

Procesní plyn je dodáván řeznou hlavou: (11)

- Během řezání plyn vyhání materiál z vyřezané štěrbinou a chrání zaostřovací čočku před poškozením struskou a nečistotami.
- Během svařování procesní plyn zamezuje přístupu kyslíku z okolí a tvorbě kuliček.

Tok procesního plynu je uzpůsobován podle trysky tak, aby: (11)

- během řezání prošlo co možná nejvíce plynu vyřezanou štěrbinou,
- během svařování, po celé délce svaru zabraňoval přístupu vzduchu z okolí a zabraňoval tak vzájemné reakci.

- **Ovládací box (Control Box)**

Ovládací box obsahuje: (11)

- dodávku energie
- ON/OFF vypínač
- distribuci energie
- bezpečnostní okruhy
- programovatelný ovladač (PLC)
- CNC ovládání s PC – Panelem
- moduly pro řízení hlavních os
- regulaci tlaku pro dva řezné plyny (N₂ a O₂)
- generátor vysokého napětí pro laser

PLC systém kontroluje bezpečnostní funkce a bezpečnostní dveře. Případně kontroluje také „doplňková“ zařízení. (11)



Obr. 5.2 Control box

CNC systém převádí plány (kontury dílů) a procesní parametry na pohyb os, stanovuje dráhu laserového paprsku na materiálu pomocí kombinace pohybů nosníku, vozíku a nástroje. Také automaticky uzpůsobuje rychlost pohybu, procesní plyny a energii laseru při výrobě geometrických kontur. (11)

Výrobní procesy, programy nerespektují jejich pořadí vstupů. Systém PC může být proto použit pro tvorbu a editování kontur za chodu jiného řezného programu. (11)

- **Ovládací box laseru**

Ovládací box laseru obsahuje: (11)

- ovládání plynů,
- ovládání laseru,
- zařízení vysokého napětí pro generování laserového paprsku.

Ovládání plynů redukuje tlak laserových plynů na specifikovanou úroveň, míchá je a dodává do laseru. (11)

Pomocí ovládání laseru se laserové zařízení aktivuje automaticky nebo manuálně v krokovém (step) režimu. Ovládání laseru kontroluje práci laseru a zobrazuje na displeji textové informace o tlaku v systému, energii, proudu, chybách a pracovním režimu laserového zařízení. (11)



Obr. 5.3 Ovládací panel

- **Laser**

Srdcem laseru je rezonátor, kde je generován laserový paprsek. Laserový plyn se skládá ze směsi plynů CO_2 , N_2 a He . Turbokompresor zajišťuje rychlý pohyb plynu podél osy rezonátoru. Plyn je chlazen v „předchladiči“ a v „pochladiči“, aby byl optimalizován převod energie z jednotky vysokého napětí do laserového plynu. (11)



Obr. 5.4 Rezonátor



Obr. 5.5 Detail rezonátoru

- **Chladící zařízení**

Velkou část absorbované elektrické energie převede laser na teplo. Toto teplo je eliminováno pomocí chladicího zařízení. Rezonátor, optický plyn a výstupní optický systém laserového paprsku je chlazen pomocí chladicího okruhu. (11)

- **Bezpečnost operátora**

Bezpečnost operátora je zajištěna pomocí bezpečnostních dveří a pevných ochranných panelů, které jsou uzpůsobeny v závislosti na umístění stroje. (11)

Stroj je vybaven také světelnými závory lineárního a nelineárního podávacího zařízení. (11)

Během řezného procesu jsou bezpečnostní dveře uzavřeny a chrání operátora před: (11)

- přímým působením radiace laseru,
- odraženou radiací laseru,
- struskou vznikající během práce,
- nebezpečím zranění během pohybu nosníku.

Světelná závora chrání operátora před nebezpečím zranění při procesu podávání. (11)

- **Systém výměnných stolů**

Skládá se z přídatného rámu (podávací rám) a dvou plošin, které se pohybují nad sebou. Výměnou těchto plošin se vyjme opracovaný kus materiálu a nový materiál se vloží do pozice pro opracování. (11)

- **Podavač**

Používá se pro automatické podávání podávaného materiálu, jakmile byl odstraněn opracovaný materiál. (11)



Obr. 5.6 Podavač

- **Filtr znečištěného vzduchu**

Zachycuje drobné částičky, které vznikají při práci a odstraňuje je. (11)

- **Pohlčovač odrazů**

Při opracovávání materiálu s vysokou reflektivností jako např. hliník a měď mohou odrazy poškodit rezonátor. Pohlčovač odrazy pohlcuje, takže se nemohou dostat zpět do rezonátoru. (11)

- **Crossjet**

Systém Crossjet je vybaven tryskou pro olejovou mlhu, která může být také použita k přímé dodávce stlačeného vzduchu na materiál bez oleje. (11)

- Aplikací jemné vrstvy oleje do prostoru před provedením propalovací operace lze zabránit uchycení rozstříknutého materiálu. (11)
- Přímá dodávka stlačeného vzduchu se používá pro odstranění rozstříknutého materiálu během propalovací operace. (11)

5.3 Technická data

Rychlost práce, opracovatelná tloušťka materiálu a spotřeba plynů závisí nejvíce ze všeho na energii laseru, materiálu, druhu práce a požadované kvalitě. (11)

Je velmi důležité zabezpečit, aby byl laser a pracovní centrum na stejném podkladu (stejný přenos vibrací). Ostatní komponenty systému mohou být umístěny nezávisle na samostatných podkladech.

Tabulky s technickými údaji jsou v příloze č. 1.

5.3.1 Mody práce laseru

Laser může být používán v následujících modech: (11)

- CW – kontinuální mod,
- MD – modulační mod,
- NP – běžný puls,
- SP – superpuls,
- MP – megapuls

Kterýkoliv z uvedených modů může být nastaven v ovládací jednotce laseru nebo prostřednictvím CNC ovládání stroje (kromě modulačního modu, který je automaticky zvolen podle potřeby automaticky přímo ovládací jednotkou).

5.4 Ovládání plynů

5.4.1 Základní pojmy

Je nutné rozlišovat mezi laserovým a procesním plynem.

Procesní plyny obsahují řezné i ochranné plyny a skládají se ze směsi kyslíku, dusíku, helia, argonu a stlačeného vzduchu.

Pro zabezpečení optimální kvality při opracovávání materiálů z plastu může být nezbytné použít smíchávání plynů. (11)

• Laserový plyn

Směs laserových plynů tvoří stlačený dusík, helium a oxid uhličitý.

V laseru tvoří CO₂ aktivní prostředek. Je buzen elektrickým výbojem a převádí elektrickou energii na infračervené záření.

Dusík se přidává za účelem zvýšení energie laseru. Převádí sílu generovanou elektrickým výbojem do CO₂.

Třetím laserovým plynem je helium, které ve směsi zastává úlohu udržování elektrického výboje a ulehčení chlazení CO₂. (11)

• Smíchávání plynů

V jednotce ovládání plynů jsou laserové plyny (He, N₂ a CO₂) smíchávány dle požadovaného poměru, který je nastaven z výroby a nelze ho měnit.

Nevhodná úprava směsi laserových plynů by měla za následek poškození laserového systému a ohrožení dodávky vysokého napětí. (11)

- **Procesní plyn**

Procesní plyny se používají k následujícím účelům: (11)

- řezný proces: odstranění tekutého materiálu ze zářezu (řezný plyn),
- řezný proces: urychlení řezného procesu díky chemické reakci s kyslíkem (řezný plyn, oxidace),
- řezání, gravírování, svařování, vytvrzování: ochrana před nežádoucí chemickou reakcí během práce laseru odstíněním pracovní zóny od interních plynů (ochranný plyn).

5.4.2 Použití plynů

- **Použití helia**

Helium je ušlechtilý plyn, který se nesmíchává s jinými chemikáliemi. Proto se také používá při svařování ocelí, hliníku, magnézia a titanu elektrickým obloukem, proti oxidaci a tvorbě nitridů. Helium má malou rozpustnost ve vodě a organických rozpouštědlech.

- **Použití dusíku**

Dusík při pokojové teplotě reaguje pouze s malým množstvím prvků jako lithium a vápník za tvorby nitridů. Dusík snadno nereaguje pouze za vysokých teplot, proto se používá jako ochranný plyn při technických procesech pro transport a skladování hořlavých tekutin. (11)

- **Použití oxidu uhličitého**

CO₂ může prudce reagovat s rozmanitými chemikáliemi, obzvláště za vysokých teplot, nelze ho proto používat jako univerzální hasidlo. Smísením CO₂ s čpavkem, methylaminem, ethylaminem, dimethylaminem, trimethylaminem může způsobit velmi nebezpečnou reakci. V případě rychlého utěsnění při atmosférickém tlaku se CO₂ zchladí a ztuhne. Při teplotě do 79 °C vytvoří suchý led, který se rychle vypařuje. (11)

5.4.3 Charakteristiky laserových plynů

Laserové plyny musí být vysoce čisté s následujícími hodnotami titrů:

N₂ 99,999% (5,0)

He 99,996% (4,6)

CO₂ 99,995% (4,5) nebo i 99,990% (4,0)

Vlhkost plynů musí být velmi nízká, protože přítomnost molekul vody snižuje energii laserového paprsku. Požadované charakteristiky plynů jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab. 5.2 Požadované charakteristiky laserových plynů (11)

Plyn	Třída	Titř [% objemu]	Obsah H ₂ O [ppm]	Obsah O ₂ [ppm]	Podíl ve směsi [%]
Helium (He)	4,6	≥ 99,996	≤ 5	≤ 5	63,1
Oxid uhličitý (CO ₂)	4,5	≥ 99,995	≤ 5	≤ 10	3,4
Dusík (N ₂)	5	≥ 99,999	≤ 5	≤ 3	33,5
Celkem					100

5.4.4 Charakteristiky procesních plynů

Požadované charakteristiky procesních plynů jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab. 5.3 Požadované charakteristiky procesních plynů (11)

Plyn	Třída	Titř [% objemu]	Mezní obsah (N ₂ + Ar) [ppm]	Obsah vody (H ₂ O) [ppm]	Řezný povrch
Kyslík (O ₂)	3,5	≥ 99,95	≤ 500	≤ 5	Oxidace
			Obsah (O ₂) [ppm]	Obsah (H ₂ O) [ppm]	
Dusík (N ₂)	2,8	≥ 99,8	≤ 500	≤ 20	Bez oxidu, slabě žlutý
Dusík (N ₂)	3,5	≥ 99,95	≤ 100	≤ 10	Bez oxidu, ne bezpodmínečně lesklý
Dusík (N ₂)	4,5	≥ 99,995	≤ 10	≤ 5	Absolutně bez oxidu, garantovaný lesk
Dusík (N ₂)	5	≥ 99,999	≤ 3	≤ 5	Absolutně bez oxidu, garantovaný lesk

5.5 Programovací software Bysoft

Soubor programů *Bysoft* umožňuje uživateli tvořit plány na stroji nebo na PC, nebo je použít z CAD systémů a nastavit je pro práci na laserovém stroji. (11)

5.5.1 Základní moduly

BYCAD - Praktický a silný 2D CAD, vytvořený pro laserové řezání.

BYDIG - Na digitalizovaném podkladu zobrazuje tvary vzoru pracovního materiálu bez rozměrů.

BYJOB – Vytváří a vyvolává pracovní úkoly (joby) uložené v souborech chemického složení.

BYSPLIT – Zabezpečuje rozdělení tak, aby bylo možné odstranění zbytkového materiálu při opracovávání tlustých materiálů.

BYWELD – Tvoří svařovací plány.

BYWORK – Vzájemné rozdělení tvarů na pracovní materiál. Zajišťuje grafický vzhled jednotlivých dílů a plánů. Simuluje práci a počítá řezný čas. (11)

5.5.2 Doplnkové moduly

BYCLOSE – Pro zracionalizování práce eliminuje překrývání řezů.

BYFLEX – Tvoří řezné plány pro trubky a profily.

BYFRAME – Počítá uzly, prvky a typ průsečíků v řezných plánech v síti souřadnic pro trubky.

BYJOIN – Převodník pro přenos CAD dat vytvořených pomocí externích programů.

BYHLK – Počítá šablonu pracovního materiálu pro výrobu strojní ventilace a topení.

BYNEST – Automatické naskládání tvarů na pracovní materiál.

BYTRACE – Převádí grafické soubory na tvary v pracovním materiálu. (11)

6 ORGANIZACE TPV VE FIRMĚ NTS PROMETAL MACHINING

Výroba dílů na základě výrobní dokumentace je jedním z hlavních procesů ve firmě. Technická příprava výroby zajišťuje vstupy pro hladký průběh výroby.

Proces TPV probíhá před zahájením výroby v souladu se smluvně stanovenými termíny dodávek. Tyto termíny jsou stanoveny v interním systému NAVISION. Za řízení TPV zodpovídá vedoucí výrobní jednotky.

V rámci TPV jsou prováděny následující činnosti.

6.1 Specifikace požadavku pro technologickou kooperaci

Tato činnost obsahuje zapracování příslušné operace do technologického postupu. Pracovník TPV zapíše požadavek na kooperaci jako pracovní operaci do úkolového listu. (19)

6.2 Vypracování úkolových listů

Úkolový list tvoří technolog v IS NAVISION. Mimo standardní údaje musí úkolový list obsahovat: (19)

- speciální požadavky zákazníka vztahující se ke konkrétnímu výrobku,
- speciální nástroje,
- speciální přípravky.

6.3 Specifikace nářadí pro výrobu

Tato činnost obsahuje: (19)

- specifikace nového komunálního nářadí pro výrobu,
- specifikace speciálního nářadí pro výrobu.

Pokud technolog rozhodne o použití nového typu nástroje, pošle svůj požadavek pracovníkovi pověřenému řízením nářadí. U běžných nástrojů kontroluje tento pracovník dostatek nářadí pro výrobu. (19)

Činnosti v této kapitole jsou součástí přezkoumání před zahájením výroby.

6.4 Specifikace přípravků pro výrobu a jejich konstrukce

Tato činnost obsahuje: (19)

- určení přípravků nutných pro výrobu (na základě přezkoumání dokumentace),

- pokud zakázka vyžaduje přípravky pro výrobu, technolog zajistí specifikaci přípravku, jeho konstrukci, kusovník, technologii a zadá výrobní číslo přípravku; pracovník předá výkresovou dokumentaci plánovači výroby,
- po vyrobení přípravku předá vedoucí výrobní jednotky tento přípravek pracovníkovi, který vystavil zakázku a ten je zodpovědný za umístění na správné pracoviště a za proškolení obsluhy, která bude tento přípravek používat; vedoucí výrobní jednotky, pro jehož pracoviště je přípravek určen, zajistí jeho naskladnění a ve spolupráci s ekonomem jeho vyvedení ze skladu,
- přípravek uloží na pracovišti, pro které je přípravek určen.

6.5 Zajištění náradí

Za zajištění náradí, jeho příjem a evidenci odpovídá pracovník pověřený řízením náradí. Tato činnost obsahuje: (19)

- výběr vhodného dodavatele s ohledem na cenu, kvalitu, termín dodání,
- vystavení a odeslání objednávky,
- sledování plnění objednávek,
- převzetí dodaného náradí, odsouhlasení s fakturou,
- evidenci náradí.

6.6 Plánování výroby

Jednotlivé zakázky do výroby zařazuje plánovač v IS NAVISION. Základním podkladem pro řízení a koordinaci činností v rámci procesu výroby je plán výroby. Jeho tvorbu zajišťuje na základě termínů dodání jednotlivých zakázek plánovač. (19)

Vedoucí výrobní jednotky zodpovídá za rozdělení práce jednotlivým pracovníkům v souladu s plánem výroby prostřednictvím fronty práce. (19)

6.7 Výrobní dokumentace

Výrobní dokumentaci tvoří: (19)

- úkolový list (tvoří technolog),
- výkresová dokumentace, výdejka na první pracoviště, měřicí protokol (pokud je požadován z kontroly)

6.8 Průběh výroby

Proces výroby řídí vedoucí výrobní jednotky. Výroba probíhá dle platné výrobní dokumentace a plánu výroby. (19)

Během výrobního procesu je zabezpečen stálý dohled nad výrobními operacemi formou dohledu vedoucích pracovníků výroby, výrobních kontrol, samokontroly každého pracovníka, který vykonává výrobní operaci.(19)

Proces průběhu výroby od příjmu materiálu ze skladů až po odvádění hotových výrobků z výroby, je řízen prostřednictvím IS NAVISION, kde jsou zároveň vedeny a uchovávány záznamy o průběhu procesu výroby. Prostřednictvím IS NAVISION je také sledován průběh realizace zakázek. (19)

6.9 Uvolnění výrobku

K uvolnění výrobku z výroby na sklad hotových výrobků nebo na montáž může dojít po provedení všech operací dle úkolového listu a vyhovujícím výsledku všech kontrol a zkoušek. (19)

Po vyhovujícím výsledku výstupní kontroly označí pracovník výrobky štítkem s kompletně vyplněnými identifikačními údaji. Tímto jsou výrobky uvolněny pro expedici nebo na montáž. (19)

Uvolněné výrobky uloží pracovník na určené místo ve skladu expedice nebo předá na montáž. (19)

6.10 Záznamy o jakosti

Záznamy z procesů technické přípravy výroby a výroby jsou řízeny podle dokumentu „Řízení záznamů o jakosti“. (19)

7 NÁVRH NA OPATŘENÍ NA ZVÝŠENÍ PRODUKTIVITY PRACOVISTĚ LASEROVÉ TECHNOLOGIE

Vzhledem k tomu, že řešení pracoviště laserové technologie ve firmě i samotný laser pochází z roku 2000, musí se počítat s tím, že bude mít určité nedostatky. Tím zdaleka nejvýznamnějším je problémový provoz 10 let starého stroje především ve smyslu spolehlivosti.

7.1 Návrh řešení – nový laser

Jak už bylo zmíněno, kamenem úrazu současného řešení pracoviště laserové technologie je v první řadě samotný laser. Problémem jsou především vysoké náklady a dlouhé prostoje související s nízkou spolehlivostí 10 let starého stroje. Jeho poruchovost vede k tomu, že v poslední době často dochází k neúnosnému zdržení provozu, což v důsledku vede k menšímu objemu realizovatelných zakázek než v minulosti a to je obzvláště v dnešní ekonomicky složité době mimořádně nepříjemné. Momentální potřebou firmy tedy je spolehlivější a také rychlejší stroj.

Další problémovou oblastí jsou možnosti použití stroje z hlediska maximální obrobitelné tloušťky plechu. Faktem je, že jeho použitelnost i dnes obsáhne až 80 % současných zakázek, rozšíření možností by přesto bylo vítaným vylepšením i z obchodního hlediska. Požadavkem je tedy vyšší výkon stroje.

Vzhledem k výše uvedenému a s přihlédnutím k aktuálním potřebám firmy s ohledem na současný přebytek zakázek se jeví jako nejvhodnější řešení investice do nákupu nového stroje.

Vybraný stroj: univerzální vysokovýkonný dynamický silový systém pro řezání laserem **Bystronic BySpeed 3015** se zdrojem **ByLaser 6000**.



Obr. 7.1 Bystronic BySpeed 3015 ByLaser 6000 (20)

Hlavním důvodem volby stejného výrobce jsou rozměry srovnatelné se starým laserem, totožná logika ovládání a programování a zkušenosti se servisem.

Charakteristika stroje:

Systém umožňuje dosahovat vysokých rychlostí polohování a hodnot zrychlení, disponuje silným pohonem systémem *DHM* s nízkým opotřebením a velkou dynamikou. Díky nejmodernějším technologiím řezání dosahuje výborné přesnosti řezání. Výhodou je, že všechny komponenty, které zajišťují bezpečnost procesu a výkonnost systémů, pocházejí z vlastního vývoje, což s sebou nese výhody v podobě dobrého sladění a relativně snadné servisovatelnosti. (20)

Z vlastností tohoto stroje plyne několik zásadních výhod: (20)

- výrazné snížení nákladů díky nižší době řezání,
- vysoká produktivita v celém spektru tloušťek plechu díky dosahovanému zrychlení 3G a výkonu laseru 6 kW,
- vysoká přesnost řezání,
- odlévaná konstrukce tlumí vibrace a tím umožňuje vyšší přesnost dílů,
- dobrá přístupnost v celé pracovní oblasti,
- možnost rozšíření o různé automatizační moduly,
- umožňuje ruční ovládání např. pro manuální dělicí řezy,
- adaptivní optika pro konstantní zaostření v celém rozsahu řezání a automatické nastavování ohniska prostřednictvím individuálních parametrů řezání,
- automatická detekce polohy okraje plechu.

7.2 Srovnání současného a navrhovaného laseru

V tabulce 7.1 je uvedeno srovnání některých důležitých parametrů.

Tab. 7.1 Porovnání starého a nového laseru (20, 11)

		ByStar 3015 Laser 40	BySpeed 3015 ByLaser 6000
Maximální tloušťky	Konstrukční ocel O ₂	20 mm	25 mm
	Konstrukční ocel N ₂	6 mm	12 mm
	Nerez ocel	10 mm	25 mm
	Hliník	10 mm	15 mm
Spotřeba laserových plynů	Helium	35 NI/h	20 NI/h
	Dusík	12 NI/h	8 NI/h
	Oxid uhličitý	2 NI/h	1,6 NI/h
	Spotřeba řezných plynů	závislá na druhu a tloušťce materiálu	
	Zaručený výstup. výkon	4000 W	6000 W
	Max. rych. polohování	169 m/min	169 m/min
	Max. osové zrychlení	4,5 m/s ²	30 m/s ²

Ze srovnání plyne, že navrhovaný stroj by vyřešil všechny zásadní nedostatky současného, ať už jde o předpokládanou výrazně vyšší spolehlivost, širší použitelnost z pohledu tloušťky materiálu, nižší spotřebu laserových plynů, o 50 % vyšší výstupní výkon a vynikající dynamiku v podobě mimořádně vysoké hodnoty osového zrychlení.

8 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Laserová technologie patří i dnes k velmi moderním a progresivním metodám obrábění, je však velmi drahá a poměrně náročná na okolní podmínky. Celkové náklady na vyřezání součástky z kapitoly 4.8 po započtení všech nákladových položek (materiál, spotřeba plynů, elektrická energie, amortizace, strojní náklady, vedlejší náklady) včetně všech následných operací (ruční úprava, zpracování na ohráňovacím lisu, pasivace a uložení na expediční sklad) činí **222,106 Kč**. Částka je výstupem kalkulace z firemního systému *NAVISION*. Z tabulky 8.1, v níž je provedena hrubá kalkulace nákladů na provoz pracoviště laserové technologie, jednoznačně vyplývá, jak finančně náročný je provoz laseru.

Tab. 8.1 Kalkulace hodinových nákladů laserového pracoviště (21)

Počet pracovních hodin za rok	4150 hod./rok
Počet směn	2
Fixní náklady provozu stroje	1524,- Kč/hod.
Energetické náklady	320,- Kč/hod.
Mzdové náklady	300,- Kč/hod.
Sociální a zdravotní pojištění	105,- Kč/hod.
Náklady na 1 hodinu provozu laseru	2249,- Kč/hod.

V tomto případě je však konečná částka ovlivněna v současnosti poměrně značnou poruchovostí stávajícího letitého zařízení. S nákupem nového laseru se dá kalkulovat se snížením této částky vzhledem k očekávané mnohem vyšší spolehlivosti a také rychlosti, přestože by byl výrazně výkonnější a tudíž měl o něco vyšší příkon.

Při pořízení laseru musí firma počítat s velkou počáteční investicí, cena zařízení navrhovaného v kapitole 7, které patří v podstatě k tomu nejvýkonnějšímu na trhu, se pohybuje okolo 500 tisíc eur, což je částka, při které si firma musí být jistá dostatečným vytížením stroje. Samozřejmostí je v tomto případě minimálně dvousměnný provoz. Při současné hojnosti zakázek se dá počítat s tím, že by se taková investice vrátila v horizontu přibližně 4 let. Problém by však nastal v případě, že by se opakovala situace z předešlých přibližně 2 let, kdy nastal obrovský úbytek zakázek a docházelo k situacím, kdy provoz laseru musel být zastaven někdy až na 3 dny v týdnu. Podle současného stavu, kdy se nestíhají zakázky plnit, však lze tuto investici především z technických a technologických důvodů uvedených v kapitole 7 doporučit.

Vzhledem k charakteru výroby, která je zaměřena na maximální univerzálnost a komplexnost se navíc firma *NTS Prometal Machining* dnes už bez laseru neobejde.

ZÁVĚR

Tato studie je zaměřena ze všeho nejvíc na pojednání o technologii řezání laserovým paprskem. Úvod seznamuje s historií a původem laserové technologie. Dále je poměrně detailně rozebrán princip laseru s popisem a jsou uvedeny principy prakticky všech druhů průmyslových laserů. Největší pozornost je pochopitelně věnována laseru z hlediska opracování materiálů. Nechybí ani srovnání jednotlivých nekonvenčních technologií řezání.

V další fázi je představena firma *NTS Prometal Machining*, které se tato technologie týká.

Následně je proveden rozbor součástkové základny z několika hledisek a rozpitvána technologičnost typových představitelů včetně uvedení přehledu metod řezání, které se uplatňují při použití stroje *Bystronic ByStar 3015*. Ve stejné kapitole je také navíc detailně popsán softwarový návrh výroby konkrétního výpalku.

Další kapitola se věnuje provozní náročnosti použití staršího typu stroje. Úsek o organizaci TPV přímo vychází z interního předpisu firmy.

Návrh na opatření na zvýšení produktivity pracoviště laserové technologie se věnuje nejvýznamnějšímu problému nízké produktivity a spolehlivosti staršího stroje a řešení tohoto problému v podobě doporučení investice do nákupu konkrétního typu nového laserového zařízení. Nutno však uvést, že jsou zde i další nedostatky, jako rezervy v organizaci skladování plechů v regálech, umístění ohraňovacího lisu příliš daleko od laseru a s tím související horší manipulace, vysoká prašnost z důvodu špatného řešení brousícího pracoviště. Řešení těchto problémů by však bylo na další mnohastránkovou studii.

Poslední kapitola se věnuje technicko-ekonomickému vyhodnocení jak provozu pracoviště laserové technologie ve firmě *NTS Prometal Machining*, tak i výroby konkrétního výpalku.

Na závěr zbývá uvést, že cena technologie laserového paprsku je především kvůli vysokým pořizovacím nákladům, drahému provozu a nutnosti odborné přípravy ve srovnání s konvenčními způsoby obrábění poměrně vysoká. Je však bohatě vyvážena možnostmi, které tato technologie poskytuje. Jsou materiály, které v požadované kvalitě buď není vůbec možné jinou technologií obrobit, nebo to jde ve srovnání s laserem jen velmi těžko. Rozhodně tedy má smysl se nekonvenčním metodám a laseru obzvláště nadále věnovat ve vývoji s cílem dalšího zvyšování výkonu, efektivity a bezpečnosti a naopak snižování energetické náročnosti a nákladovosti pořízení i provozu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SEDLÁČEK, K. *Laser v mnoha podobách*. Naše vojsko. Praha, 1982.
2. MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technologie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
3. BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. Skriptum ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989. 122 s.
4. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. *Obrábění paprskem fotonů – laserem*. [online]. 2007. [citováno 18. 2. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-4-dil>>.
5. ROUBÍČEK, M. *Řezání CO₂ laserem – optický systém Bifocal*. [online]. 2008. [citováno 13. 2. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/rezani-co2-laserem-opticky-system-bifocal>>.
6. KOCMAN, K. A PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
7. ZATLOUKAL, P. *Laserové dělení materiálu*. [online]. 2007. [citováno 25. 3. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://welding.cz/laser/deleni.htm>>.
8. *The powerful combination of quality, complex solution and cost reduction*. [online]. [citováno 23. 2. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.nts-group.nl/prometal/index.php?lang=en>>.
9. ČMIEL, M. *Analýza nekonvenčních technologií obrábění s využitím ve strojírenství: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007.
10. BYSTRONIC LASER AG. *Technologie řezání*. 2007.
11. BYSTRONIC LASER AG. *Uživatelský manuál*. 1998.
12. ŠULC, J. *Lasery a jejich aplikace*. [online]. 2002. [citováno 25. 3. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>>.
13. JANATA, M. *Průmyslové lasery a jejich aplikace*. [online]. 2006. [citováno 25. 3. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/pdf/Lasery_clanek-MJ.pdf>.
14. MINAŘÍK, V. *Technologické lasery*. [online]. 2007. [citováno 25. 3. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>>.
15. ASM International. SEMIATIN, S. L. *ASM Handbook*. [online]. [citováno 29. 3. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <http://books.google.com/books?id=ekEe4UwqkVUC&pg=PA113&lpg=PA113&dq=Slow+axial+flow+laser&source=bl&ots=MVJBhGpVEX&sig=k_4ta13Y0Fu1HYexxDR1i47OOIM&hl=cs&ei=wKbPSfPzLYmRsAa68JG_CA&sa=X&oi=book_result&resnum=1&ct=result#PPA892,M1>.
16. *Zvláštní světlo*. [online]. [citováno 28. 3. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.fascination-of-light.net/campaign-cz/vystava/laser-2013-zvlastni-svetlo/vlaknovy-laser-2013-vedene-svetlo>>.
17. MEDICOM, a.s. *Prospekt a technická data LASERfibre LF20T*. [online]. 2008. [citováno 28. 3. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.medicom.cz/UserFiles/File/Prumyslove/LF20T.pdf>>.

18. *Jiné zdroje světla*. [online]. [citováno 28. 3. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ben.cz/d/ukazka/120954u.pdf>>
19. NTS Prometal Machining, s.r.o. *TPV a řízení výroby*. Interní dokument NTS Prometal Machining, s.r.o. Slavičín, 2008.
20. *Technické údaje Bystronic BySpeed 3015 ByLaser 6000*. [online]. [citováno 2. 10. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.bystronic.com>>
21. Interní nešifritelné zdroje NTS Prometal Machining.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
a	[mm]	Strana formátu plechové tabule
b	[mm]	Strana formátu plechové tabule
E_1	[J]	Energie atomové hladiny
E_2	[J]	Energie atomové hladiny
f	[Hz]	Frekvence emitovaného kvanta světelného záření
h	[J.s]	Planckova konstanta
I	[W.mm ⁻²]	Intenzita laseru
P	[W]	Výkon laseru
S	[mm ²]	Plocha, na kterou je laserový paprsek fokusován
S_T	[mm ²]	Plocha formátu plechové tabule

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Technické údaje laserového zařízení *Bystronic Bystar 3015*
Příloha 2 Výkres součásti
Příloha 3 Bywork order list

