

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



PETR JAHN

KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ
PRO VYTVRZOVÁNÍ
ČI VRSTVENÍ MATERIÁLU
(RP – HLAVY)

DIPLOMOVÁ PRÁCE

1999

Technická univerzita Liberec

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Obor : Výrobní systémy

Zaměření : Pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu

KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ PRO VYTVRZOVÁNÍ ČI VRSTVENÍ MATERIÁLU (RP – HLAVY)

KVS - VS - 105

Petr Jahn

Vedoucí práce : Doc. Ing. Přemysl Pokorný, Csc.

Konzultant : Ing. Jiří Karásek

Počet stran69
Počet příloh.....4
Počet tabulek12
Počet obrázků22
Počet výkresů.....1

Datum : 25.5.1999



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

Petr J a h n

obor

23 - 29 - 8 Výrobní systémy

zaměření

pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Konstrukce zařízení pro vytvrzování či vrstvení materiálu (RP-Hlavy)

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Rozbor současného stavu.
2. Souhrn a zhodnocení metod dle hledisek náročnosti konstrukce, provozu, údržby.
3. Návrh koncepce v alternativách-zhodnocení.
4. Konstrukce vybrané alternativy.
5. Dle finančních možností - zkoušky + díly prototypu.
6. Zhodnocení.

KVŠ/PVS
68 s., 8 s. příl.

V 156/99 S

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva cca 30 stran
- grafické práce dle potřeby

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

Breník, P. - Píč, J.: Obráběcí stroje, Konstrukce a výpočty

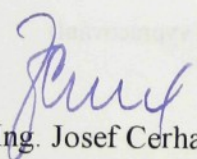
Rapid News – TCT HOUSE, 1 WORLEY COURT, TATTENHALL, CHESHIRE, CH3 9HL, ENGLAND

Slévárnoství 1-2/1998

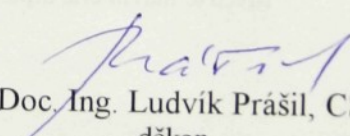
Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Přemysl Pokorný, Csc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Karásek

L.S.


Doc. Ing. Josef Cerha, Csc.
vedoucí katedry




Doc. Ing. Ludvík Prášil, CSc.
děkan

V Liberci dne 31. 10. 1998

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

ANOTACE

Označení DP : KVS - VS - 105

Řešitel : Petr Jahn

TÉMA : Konstrukce zařízení pro vytvrzování či vrstvení materiálu

ANOTACE :

Práce se zabývá jednotlivými typy laserů a jejich využití v různých odvětvích průmyslu. Konstrukční varianty laserového zařízení jsou používány v procesech jako svařování, řezání, vytvrzování kovů a plastických hmot. Tyto technologie a návrh modifikované laserové hlavy je možné použít jako přídatný prvek ke standardnímu zařízení. Možnosti, specifikace laserů a konstrukce univerzální laserové hlavy je zde uvedena.

THEME : Design of the equipment for metal hardening or plastics curing and material laminating

ANNOTATION :

The work deals with different laser types, their application in different sectors of industry. Design varieties of laser equipment are used in processes like welding, cutting, metal hardening and plastics curing. These technologies and modified laser head may be applied as additional to standard equipment. The possibilities, laser specifications, design of universal laser head is here shown.

Deset. třídění : 621.9

Klíčová slova : laser, laserová hlava, vytvrzování, vrstvení

Zpracovatel : TU Liberec - KVS

Dokončeno : 1999

Archivní označení zprávy :

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího a konzultanta.

V Liberci 25.5.1999

Obsah	12
Seznam použitých zdrojů a literatury	12
Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	12
1. ÚVOD	14
2. SOUČASNÝ STAV	15
2.1. Charakteristika laserů	15
2.2. Druhy laserů	16
2.3. Činný princip	18
2.4. Klasifikace laserů	19
2.5. Pevno-tekuté lasery	20
2.6. Plynné lasery	21
2.7. Polovodičové lasery	22
2.8. Laserové diody	23
2.9. Laserové systémy	24
2.10. Laserové aplikace	25
2.11. Laserové systémy	26
2.12. Laserové systémy	27
2.13. Laserové systémy	28
2.14. Laserové systémy	29
2.15. Laserové systémy	30
2.16. Laserové systémy	31
2.17. Laserové systémy	32
2.18. Laserové systémy	33
2.19. Laserové systémy	34
2.20. Laserové systémy	35
2.21. Laserové systémy	36
2.22. Laserové systémy	37
2.23. Laserové systémy	38
2.24. Laserové systémy	39
2.25. Laserové systémy	40
2.26. Laserové systémy	41
2.27. Laserové systémy	42
2.28. Laserové systémy	43
2.29. Laserové systémy	44
2.30. Laserové systémy	45
2.31. Laserové systémy	46
2.32. Laserové systémy	47
2.33. Laserové systémy	48
2.34. Laserové systémy	49
2.35. Laserové systémy	50
2.36. Laserové systémy	51
2.37. Laserové systémy	52
2.38. Laserové systémy	53
2.39. Laserové systémy	54
2.40. Laserové systémy	55
2.41. Laserové systémy	56
2.42. Laserové systémy	57
2.43. Laserové systémy	58
2.44. Laserové systémy	59
2.45. Laserové systémy	60
2.46. Laserové systémy	61
2.47. Laserové systémy	62
2.48. Laserové systémy	63
2.49. Laserové systémy	64
2.50. Laserové systémy	65
2.51. Laserové systémy	66
2.52. Laserové systémy	67
2.53. Laserové systémy	68
2.54. Laserové systémy	69
2.55. Laserové systémy	70
2.56. Laserové systémy	71
2.57. Laserové systémy	72
2.58. Laserové systémy	73
2.59. Laserové systémy	74
2.60. Laserové systémy	75
2.61. Laserové systémy	76
2.62. Laserové systémy	77
2.63. Laserové systémy	78
2.64. Laserové systémy	79
2.65. Laserové systémy	80
2.66. Laserové systémy	81
2.67. Laserové systémy	82
2.68. Laserové systémy	83
2.69. Laserové systémy	84
2.70. Laserové systémy	85
2.71. Laserové systémy	86
2.72. Laserové systémy	87
2.73. Laserové systémy	88
2.74. Laserové systémy	89
2.75. Laserové systémy	90
2.76. Laserové systémy	91
2.77. Laserové systémy	92
2.78. Laserové systémy	93
2.79. Laserové systémy	94
2.80. Laserové systémy	95
2.81. Laserové systémy	96
2.82. Laserové systémy	97
2.83. Laserové systémy	98
2.84. Laserové systémy	99
2.85. Laserové systémy	100

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Přemyslu Pokornému a konzultantovi Ing. Jiřímu Karáskovi za poskytnuté cenné rady a připomínky při psaní diplomové práce.

OBSAH :

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	9
Seznam obrázků.....	12
Seznam tabulek.....	13
1. ÚVOD	14
2. SOUČASNÝ STAV.....	15
2.1. Charakteristika laseru	15
2.2. Buzení	15
2.3. Optický rezonátor	16
2.4. Klasifikace laserů.....	19
2.5. Pevno-látkové lasery.....	22
2.6. Plynové lasery.....	24
2.7. Polovodičivé lasery.....	25
2.8. Kapalinové lasery	25
2.9. Chemické lasery.....	26
2.10. Excimerové lasery.....	27
2.11. Lasery s volnými elektrony.....	27
2.12. Charakteristické hodnoty laserů.....	27
2.13. Aplikace laserů.....	29
2.13.1. Využití k optickému ohřevu	29
2.13.2. Obrábění laserovým svazkem	30
3. TEPELNÉ ÚČINKY PAPRSKŮ LASERU	31
3.1. Fyzikální podstata laserové technologie.....	33
3.1.1. Intenzita elektromagnetické vlny.....	33
3.1.2. Vlnová délka	34
3.1.3. Délka impulsu	34
3.1.4. Rozbíhavost.....	35
3.1.5. Odrazivost.....	36
3.1.6. Absorpce	36
3.2. Principiální uspořádání a obecné vztahy tepelného zpracování.....	38
3.3. Vytvrzování kovů – kalení	41
3.4. Vytvrzování akrylátů a jiných plastických hmot.....	41
3.5. Řezání laserem.....	45
3.6. Svařování	47

4.	NÁVRH ZÁKLADNÍHO USPOŘÁDÁNÍ.....	48
4.1.	Přenos pomocí optiky.....	48
4.2.	Přenos pomocí vlnovodu.....	49
4.2.1.	Vlnovod a jeho charakteristika	50
4.2.2.	Charakteristické vlastnosti optických vláken	51
4.3.	Konstrukční možnosti uspořádání	54
4.3.1.	Otočná optika	54
4.3.2.	Pohyblivý stůl.....	54
5.	ROZBOR NÁVRHŮ VARIANT KONSTRUKCE	55
5.1.	Konstrukce optické hlavy s pevným zrcátkem.....	55
5.2.	Konstrukce optické hlavy s jedním otočným zrcátkem.....	56
5.3.	Konstrukce optické hlavy se dvěma otočnými zrcátky	59
5.4.	Konstrukce otočné optické hlavy.....	59
5.5.	Možnosti využití	60
6.	NÁVRH POHONU	60
7.	VOLBA VÝSLEDNÉ KONSTRUKČNÍ VARIANTY	62
8.	ZHODNOCENÍ.....	62
9.	ZÁVĚR	67
	Použitá literatura.....	68
	Seznam příloh a přílohy.....	69

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ :

B	buzení
C	povrch vlákna
FDM	nanášení materiálu (Fused Deposition Modeling)
F-P	Fabryův – Perotův rezonátor
LOM	nanášení laminováním (Laminated Object Manufacturing)
LS	laserový svazek
Nd:skel	neodymový laser, kde nosným prostředím je sklo
Nd:YAG	neodym-yttrito-hlinitý granátový laser
PA	paprsek
PN	polovodičový přechod
RE	relaxace
SE	stimulovaná emise
SGC	vytvrzování ploch (Solid Ground Curing)
SLA	stereolitografie (Stereolithography)
SLS	výběrové laserové spékání (Selectiv Laser Sintering)
Z ₁ , Z ₂	zrcadla 1, 2

α	[m ⁻¹]	koeficient absorpce
α_B	[°]	Brewsterův úhel
β	[°]	maximální úhel natočení zrcátka
Φ	[1]	fázová konstanta
ω	[s ⁻¹]	kruhová frekvence vlny
ϵ	[F/m]	permitivita vakua
Θ	[°]	úhel rozbíhavosti
ϕ	[°]	úhel vstupu paprsku do vlnovodu
ϕ_1	[mm]	průměr čočky 1
ϕ_2	[mm]	průměr čočky 2
λ	[nm]	vlnová délka
τ_c	[s]	relaxační doba energie v rezonátoru
ΔF	[m]	vzdálenost ohniska od předmětu
ϵ_0	[V/m]	amplituda impulsu záření
λ_t	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti

ω_y	$[s^{-1}]$	úhlová rychlost otáčení kolem osy y
A	[1]	absorpce
B	[mm]	vzdálenost mezi čočkami
a	[m]	apertura zrcadla
a_1	[m]	vzdálenost povrchu součásti od zrcátka
A_b	$[m^2]$	celková plocha vláken
A_c	$[m^2]$	plocha tvořená jádry vláken
c	[m/s]	rychlost světla
C_{PS}	$[kJ.kg^{-1}.K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
d	[m]	průměr jádra vlákna
D	[m]	vnější průměr vlákna
D_S	[m]	průměr skvrny
D_{IN}	[mm]	průměr svazku na vstupu
D_{OUT}	[mm]	průměr svazku na výstupu
E	[V/m]	intenzita elektrického pole
E_R	[J]	reakční energie
E_Z	[J]	ztrátová energie
f	$[s^{-1}]$	frekvence
F	[m]	ohnisková vzdálenost
f_b	[mm]	ohnisková vzdálenost
f_I	$[s^{-1}]$	četnost výskytu impulsů
f_R	[Hz]	rezonanční frekvence
I	$[W/m^2]$	intenzita záření (plošná hustota výkonu)
K	[1]	index absorpce kovu
k	$[m^{-1}]$	vlnové číslo
K_P	[1]	koeficient překrytí
L	[m]	vzdálenost zrcadel
L_c	[m]	vzdálenost clony od objektu
L_m	[K]	latentní teplo tání
L_P	[m]	délka laserového paprsku
L_v	[K]	latentní teplo vypařování
L_z	[m]	délka zpracovaného místa
m	[kg]	hmotnost
n	[1]	index lomu prostředí

N_1	[1]	index odrazivosti jádra vlákna
N_2	[1]	index odrazivosti povlaku vlákna
NA	[1]	numerická apertura
N_F	[1]	Fresnelovo číslo
n_I	[1]	počet impulsů
P	[W]	výkon
P_d	[1]	hustota vláken ve svazku
Q	[1]	činitel jakosti rezonátoru
q	[W/m ²]	plošná hustota výkonu
q_1, q_2	[1]	bezrozměrné parametry
q_c	[W/m ²]	kritická hustota výkonu
R	[1]	odrazivost
r_1, r_2	[m]	poloměry křivosti zrcadel
R_1, R_2	[1]	reflektance zrcadel
r_s	[m]	efektivní rozměr svazku paprsků
S	[m ²]	plocha skvrny
S_R	[m]	rozteč dvou sousedních skvrn
t	[s]	doba záření
T	[1]	transmitance
T_o	[K]	počáteční teplota
T_o	[K]	teplota fázových přeměn
T_r	[K]	teplota varu
T_t	[K]	teplota tání materiálu
U	[J]	energie záření
v	[m/s]	fázová rychlost
v_P	[m/s]	rychlost posuvu
v_r	[m/s]	rychlost, při které dochází k varu
v_t	[m/s]	rychlost, při které dochází k tavení
v_x	[m/s]	rychlost pohybu laserového paprsku
v_z	[m/s]	rychlost zpracování
x_1	[mm]	délka pracovního prostoru v ose x

SEZNAM OBRÁZKŮ :

Obr.1.:Energetické schéma tříhladinového systému.	15
Obr.2.:Graf stabilní a nestabilní konfigurace rezonátoru; zakroužkované oblasti označují nestabilní konfiguraci a vyšrafovaná oblast označuje stabilní konfiguraci.	17
Obr.3.:Konfigurace pevno-látkového laseru.	22
Obr.4.:Součásti pevno-látkového laseru.	23
Obr.5.:Budící dutiny.....	24
Obr.6.:Proces ohřívání kovového materiálu.....	31
Obr.7.:Impuls optického záření.	34
Obr.8.:Průběh intenzity záření. /1/.....	35
Obr.9.:Závislost absorpce na teplotě.....	37
Obr.10.: Závislost absorpce na vlnové délce.....	38
Obr.11.: Zařízení pro povrchové kalení.	38
Obr.12.: Schéma zaostřovací hlavičky CO ₂ laseru s chlazením čochy vodou a připouštěním plynu (LS – laserový svazek). /1/ ..	45
Obr.13.: Schéma zařízení s přenosem záření pomocí optiky.	49
Obr.14.: Schéma zařízení s přenosem záření pomocí vlnovodu.	50
Obr.15.: Přenos laserového paprsku R :.....	52
A) Přímým vedením	
B) Zahnutým vedením	
Obr.16.: A) Samostatné vlákno.....	53
B) Svazek vláken	
Obr.17.: Schéma zařízení se zrcátky.	54
Obr.18.: Schéma zařízení s pohyblivým stolem.	55
Obr.19.: Konstrukce zařízení s pevným zrcátkem.....	63
Obr.20.: Konstrukce zařízení s jedním otočným zrcátkem.	64
Obr.21.: Konstrukce zařízení se dvěma otočnými zrcátky.	65
Obr.22.: Konstrukce zařízení s otočnou a posuvnou optickou hlavou.	66

SEZNAM TABULEK :

Tab.1. Přehled typů laserů.	21
Tab.2. Charakteristické hodnoty pevnolátkových laserů.	28
Tab.3. Charakteristické hodnoty plynových laserů.	28
Tab.4. Charakteristické hodnoty polovodičových laserů s různými aktivními prostředími.	28
Tab.5. Charakteristické hodnoty barvivových laserů v závislosti na použitém rozpouštědle.	29
Tab.6. Délka aktivního prostředí a výkon ostatních laserů.	29
Tab.7. Charakteristické hodnoty strojů firmy 3Dsystems.	42
Tab.8. Závislost rychlosti řezání na výkonu zařízení a použitém plynu. ...	46
Tab.9. Nd:YAG lasery pro řezání, vrtání a svařování.	46
Tab.10. Lasery pro značení.	47
Tab.11. Tabulka příkladů čoček a jejich uspořádání.	56
Tab.12. Tabulka hodnot pro volbu pohonu zrcátka v závislosti na vzdálenosti a_1 zrcátka od povrchu součásti.	59

1. ÚVOD

V současnosti probíhá rozvoj nových technologií zvláště takových, které slouží ke zrychlení cyklu vývoj, výroba, užití.

Jednou z těchto technologií je metoda nazývaná Rapid Prototyping, což lze v překladu vyjádřit jako rychlé zhotovování prototypů. Mezi metody Rapid Prototypingu lze řadit řadu nejnovějších technologických postupů ať již obrábění, nejčastěji však metody využívající ke tvorbě prototypů nanášení vrstev různých materiálů.

Běžně používanými materiály jsou kovy, nekovy, plasty a keramické materiály.

Metody mohou pro nanášení vrstev materiálu používat světla, tepla, obrábění a lepení.

Nejčastěji se setkáváme s využitím generátoru laserového záření laseru, který může být užíván k vytváření, řezání či svařování. V těchto oblastech využití lasery v posledním období absolvovaly značný postup a nachází stále širší uplatnění v různých odvětvích průmyslu.

Na našem trhu se objevuje stále více firem nabízejících laserové systémy pro zpracování materiálů moderními metodami např. firmy CHEVAL, PRIMA INDUSTRIE, EOS, 3D systems a mnoho dalších.

Cílem této práce je teoretický rozbor vlastností jednotlivých typů zařízení a vlastní konstrukce zařízení, které by umožňovalo víceúčelové využití ve výrobě buďto jako samostatné zařízení, nebo jako přidavné zařízení pro Rapid Prototyping.

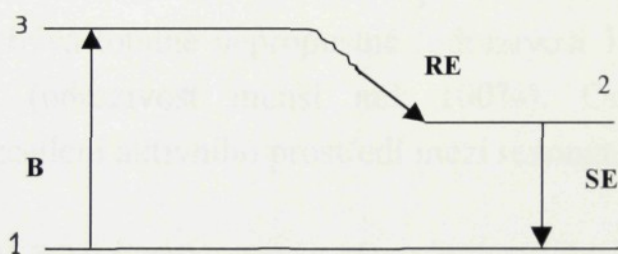
2. SOUČASNÝ STAV

2.1. CHARAKTERISTIKA LASERU

Laser je zařízení, které pracuje jako generátor záření určité části spektra. Záření vzniká v optickém rezonátoru působením vnějšího zesílení – *buzení*, jehož důsledkem se poruší rovnováha v rezonátoru a vytvoří se stav, kdy mezi dvěma hladinami nastane inverzní populace.

Inverzní populace je podmínka potřebná pro uskutečnění laserového jevu a znamená, že je počet atomů na hladině 2 větší než na hladině 1. Při inverzi vzniká více fotonů než se absorbuje, a díky tomu dochází k zesílení vlny, která prochází aktivním prostředím.

Tato vlna sbírá fotony a převádí energii excitace (vybuzení) atomů na koherentní záření. Zesílení vlny se nazývá zápornou absorpcí. Prostředí, ve kterém se zesiluje záření, se nazývá *laserové aktivní prostředí*. Energie tohoto záření je potom rovna energetickému rozdílu dvou hladin, mezi nimiž došlo k vytvoření inverzní populace.



Obr.1.: Energetické schéma tříhladinového modelu.

/1/

B...buzení (čerpání), RE...relaxace (nezářivé přechody), SE...stimulovaná emise (generace)

2.2. BUZENÍ

Ve tříhladinovém schématu se atomy ze základního stavu vybudí do excitovaného stavu 3. Horní třetí hladina se může rozpadnout díky spontánním a indukovaným přechodům $3 \rightarrow 2$, $3 \rightarrow 1$. Metastabilní hladina 2 je obsazována shora přechodem $3 \rightarrow 2$. Je-li doba života na této hladině relativně dlouhá (rychlost jejího rozpadu - frekvence přechodu $2 \rightarrow 1$ je mnohokrát menší než rychlost jejího obsazení - frekvence přechodů $3 \rightarrow 2$),

pak na druhé hladině bude atomů více než na první. Výsledkem tohoto jevu je inverze, což vede ke generaci fotonů s energií rovnou rozdílu

$$E_1 - E_2.$$

Buzení nebo-li čerpání je vytváření a udržování termodynamicky nerovnovážného stavu v látce, který se uskutečňuje zvyšováním populace energetických hladin soustav. Je to proces přeměny různých forem energie na excitační energii.

K buzení jsou většinou používány výbojky pracující v impulsním režimu a dávají silný světelný výboj o délce trvání řádově 1 [ms].

2.3. OPTICKÝ REZONÁTOR

Je to zařízení, které je schopné hromadit, nebo na jistou dobu udržet optické záření v omezené oblasti prostoru. Tento prvek pomáhá formovat vyzářované elektromagnetické pole laserového záření.

Rezonátor se skládá ze dvou zrcadel obvykle kruhového tvaru, se společnou optickou osou a reflexními povrchy obačeny proti sobě. Jedno zrcadlo bývá totálně nepropustné (odrazivost 100%), druhé zrcadlo polopropustné (odrazivost menší než 100%). Odrazivost je volena s ohledem na zesílení aktivního prostředí mezi rezonátory.

VNITŘNÍ REZONÁTOR

V tomto případě jde o vzájemné umístění rezonátoru a aktivního prostředí tak, že aktivní prostředí dosahuje od jedné odrazné vrstvy zrcadla ke druhé vrstvě bez přerušení jiným optickým prostředím.

VNĚJŠÍ REZONÁTOR

Jestliže naopak tvoří aktivní prostředí kompaktní celek k němuž je zvnějšíku přiložen F-P rezonátor (rezonátor s plochými zrcadly), takže mezi odraznými vrstvami a aktivním prostředím je vrstva materiálu s jiným indexem lomu, jde o vnější rezonátor.

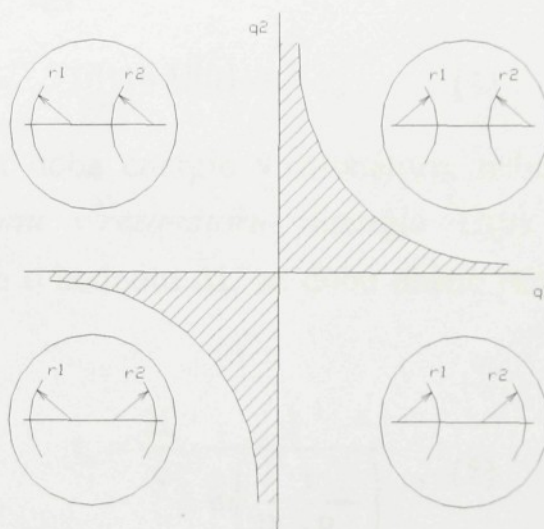
REZONÁTOR JE DEFINOVÁN:

- tvarem apertury obrysové křivky zrcadla
- tvarem plochy zrcadel
- vzájemnou vzdáleností zrcadel

POŽADAVKY NA KVALITU ZRCADEL

- přesnost opracování zrcadel musí splňovat podmínku, že nepřesnost opracování nesmí překročit dvacetinu vlnové délky generovaného záření
- ztráty na parazitních rozptylech by měli být co nejmenší, což znamená, že čím menší bude průměr zrcadel a čím bude větší vzdálenost mezi nimi, tím budou tyto ztráty vyšší
- z technologických důvodů musí mít zrcadlo nenulovou tloušťku materiálu
- jedna strana je pokryta odraznou vrstvou

STABILITA REZONÁTORU



Obr.2.: Graf stabilní a nestabilní konfigurace rezonátoru; zakroužkované oblasti označují nestabilní konfiguraci a vyšrafovaná oblast označuje stabilní konfiguraci.

q_1, q_2 jsou bezrozměrné parametry dané vztahy:

$$q_1 = 1 - \frac{L}{r_1} \quad (1)$$

$$q_2 = 1 - \frac{L}{r_2} \quad , \quad (2)$$

kde r_1 a r_2 jsou poloměry křivosti zrcadel, a L je vzdálenost zrcadel.

Tyto parametry určují podle vztahu (13), zda je rezonátor stabilní či nestabilní.

Rezonátor je stabilní, jestliže platí:

$$0 < q_1 q_2 < 1 . \quad (3)$$

/1/

ENERGIE ZÁŘENÍ V REZONÁTORU

Pokles energie v nebuzeném rezonátoru je dán především jeho vlastními ztrátami.

$U(t)$...celkové energie záření o frekvenci f uvnitř rezonátoru vyjádřená časem t

$U(0)$...energie v rezonátoru v čase $t=0$

Časový pokles může být popsán exponenciálně:

$$U(t) = U(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_c}} , \quad (4)$$

kde τ_c je relaxační doba energie v rezonátoru, nebo ji můžeme nazvat *dobou života fotonu v rezonátoru*. Energie $U(0)$ soustředěná uvnitř rezonátoru poklesne o hodnotu ΔU za dobu oběhu rezonátorem $\Delta t = 2L/c$, z toho plyne:

$$\tau_c = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{1}{R_1 \cdot R_2}\right)} , \quad (5)$$

kde R_1, R_2 jsou reflektance obou zrcadel, a c je rychlost světla.

Čím menší jsou ztráty v rezonátoru, tím je τ_c větší a tím větší je i činitel jakosti rezonátoru Q , který je mírou schopnosti optického rezonátoru uchovat energii, a je dán vztahem:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot \tau_c , \quad (6)$$

kde f_r je rezonanční frekvence.

/2/

Pro tento výpočet jsem uvažoval, že jde o tzv. Fabryův-Perotův rezonátor, který je uzavřený nekonečnými zrcadly. Ztráty energie rezonátoru jsou dány pouze propustností zrcadel.

V praxi mají zrcadla konečné rozměry, a prostor, v němž dochází k soustředění energie není uzavřený, takový rezonátor se nazývá *otevřený*.

OTEVŘENÝ REZONÁTOR

V nejjednodušším případě je rezonátor tvořen dvěma odraznými plochami (zrcadly). Výkon záření prostupující polopropustným zrcadlem představuje tzv. *činné ztráty rezonátoru*.

Je-li průměr zrcadel podstatně menší než jejich vzdálenost, dochází k úniku energie optického záření z otevřeného rezonátoru, který se nazývá *difrakční ztráty*. Difrakční ztráty rezonátoru jsou tím větší, čím menší je příčný rozměr zrcadel, nebo roste-li délka rezonátoru.

Aby difrakční ztráty byly zanedbatelné, musí platit:

$$N_F = \frac{a^2}{4 \cdot \lambda \cdot L} \gg 1, \quad (7)$$

kde a je apertura zrcadla, L je délka rezonátoru, a λ je vlnová délka a N_F je bezrozměrný parametr, který se nazývá *Fresnelovo číslo*.

/2/

2.4. KLASIFIKACE LASERŮ

HLEDISKA PRO KLASIFIKACI LASERŮ:

1. Aktivní prostředí :

- pevno-látkové (rubínový, Nd:YAG, Nd:skel)
- polovodičové (GaAs, InAs, PbS)
- plynové (helium-neonový, argonový, CO₂, helium-kadmiový)
- kapalinové
- plazmatické

2. Vlnová délka optického záření :

- infračervené
- viditelného pásma
- ultrafialové
- rentgenové

3. Typ kvantových přechodů :

- molekulární
- elektronové
- jaderné

4. Typ buzení :

- optické
- elektrickým výbojem
- elektronovým svazkem
- tepelnými změnami
- chemicky
- rekombinací

5. Časový režim provozu laseru :

- impulsní
- kontinuální

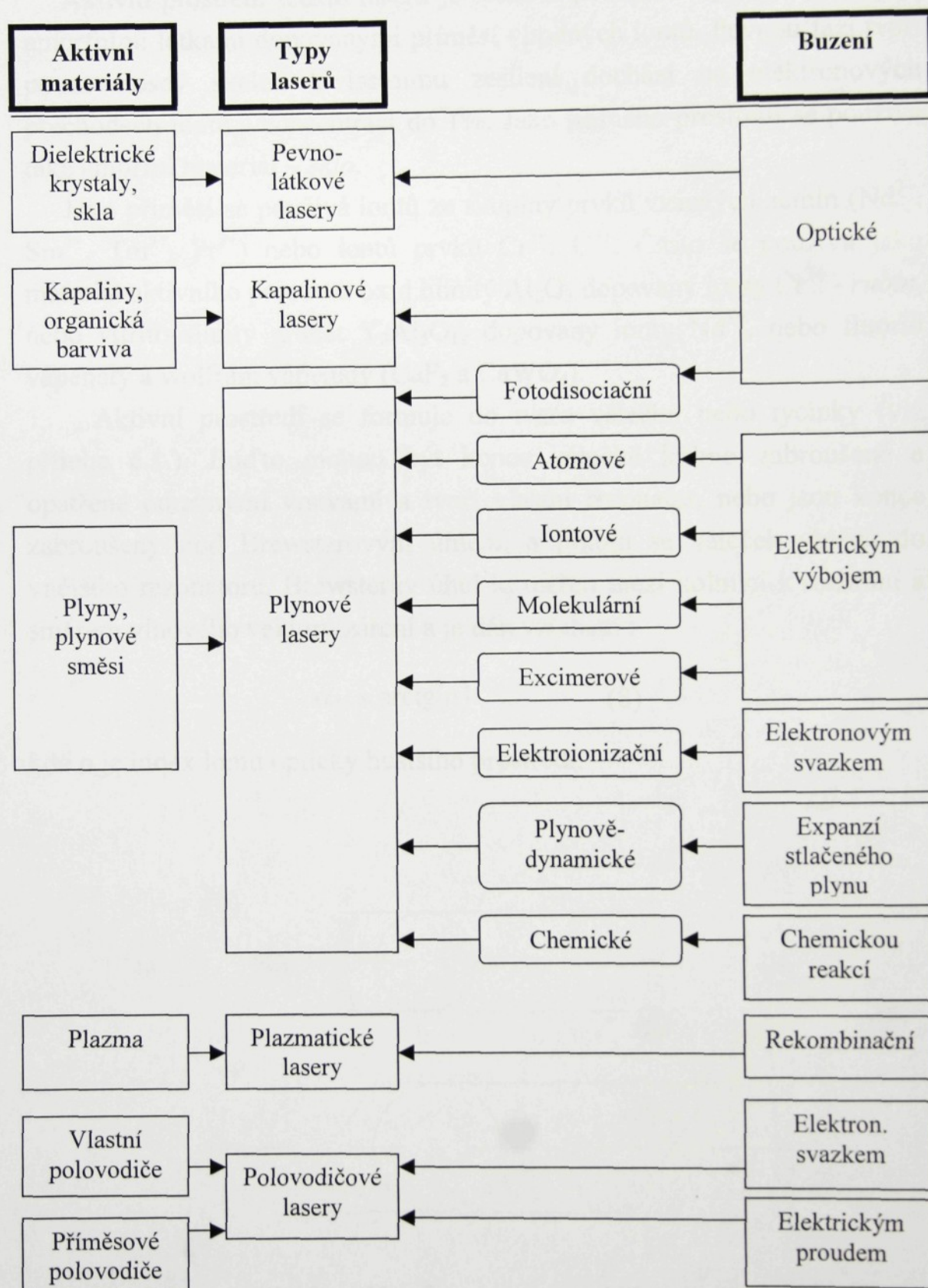
6. Délka generovaného impulsu :

- dlouhé impulsy (mikrosekundové)
- krátké impulsy (nanosekundové)
- velmi krátké impulsy (pikosekundové, femtosekundové)

Rozdíl mezi impulsním a kontinuálním laserem spočívá v tom, že impulsní laser dává záření ve formě krátkých časových pulsů, což je umožněno závěrkou, která je umístěna v rezonátoru a kontinuální laser dává nepřetržité záření.

Jako laserové aktivní prostředí můžeme použít různé materiály v různých skupenských stavech. V další části popisují pouze základní, nejpoužívanější typy laserů.

Tab.1. Přehled typů laserů.



2.5. PEVNO-LÁTKOVÉ LASERY

Aktivní prostředí těchto laserů je tvořeno pevnými krystalickými nebo amorfními látkami dopovanými příměsí vhodných iontů. Pevnou fázi tvoří pouze nosný skelet, k vlastnímu zesílení dochází na elektronových přechodech iontů s koncentrací do 1%. Jako nosného prostředí se používá také amorfní materiál – *sklo*.

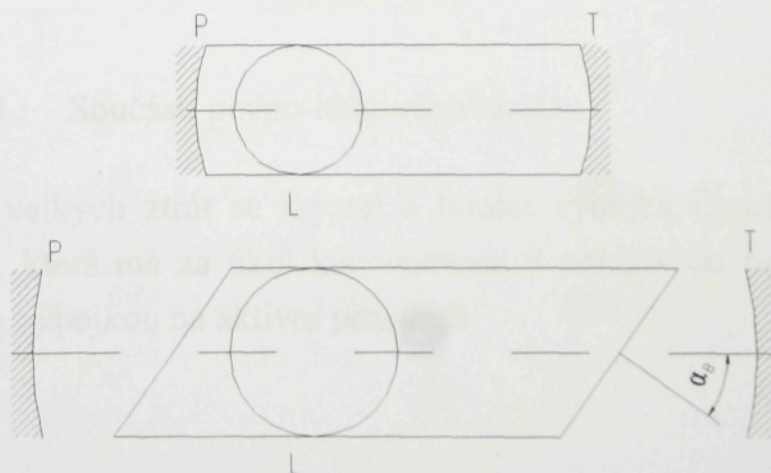
Jako příměsí se používá iontů ze skupiny prvků vzácných zemin (Nd^{3+} , Sm^{2+} , Tm^{3+} , Pr^{3+}) nebo iontů prvků Cr^{3+} , U^{3+} . Často se používá jako materiál aktivního prostředí oxid hlinitý Al_2O_3 dopovaný ionty Cr^{3+} - *rubín*, nebo yttrito-hlinitý granát $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ dopovaný ionty Nd^{3+} , nebo fluorid vápenatý a wolfram vápenatý (CaF_2 a CaWO_4).

Aktivní prostředí se formuje do tvaru válečku nebo tyčinky (viz příloha č.1.). Buďto mohou být konce válečků kolmo zabroušené a opatřené odraznými vrstvami a tvoří vlastní rezonátor, nebo jsou konce zabroušeny pod Brewsterovým úhlem, a potom se váleček vkládá do vnějšího rezonátoru. Brewsterův úhel je měřen mezi kolmicí k rozhraní a směrem vlnového vektoru záření a je dán vztahem :

$$\alpha_B = \arctg(n) , \quad (8)$$

kde n je index lomu opticky hustšího prostředí.

/2/



Obr.3.: Konfigurace pevnolátkového laseru.

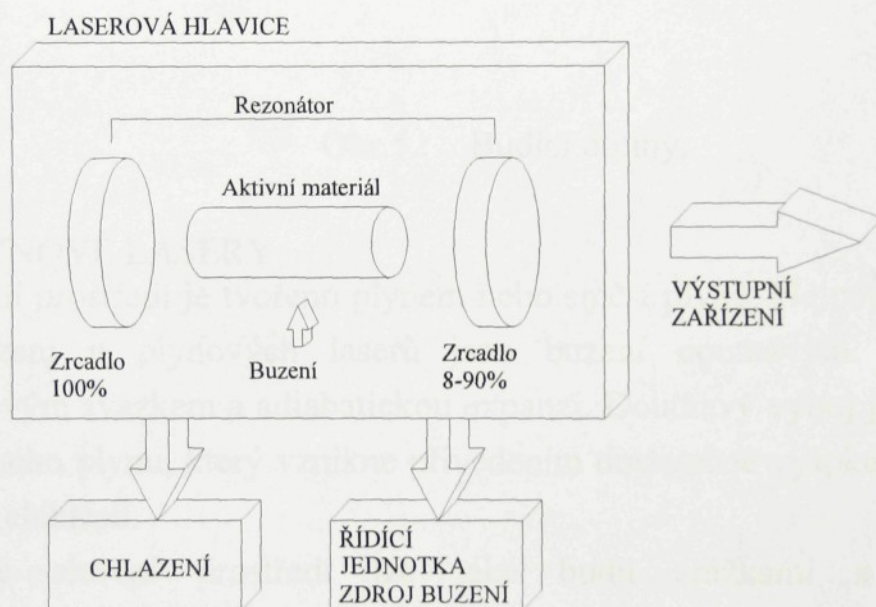
Budícím zdrojem bývá výbojka naplněná xenonem nebo rtutí, pracující buďto v kontinuálním nebo v impulsním režimu.

Pevno-látkové lasery častěji pracují v impulsním režimu.

PEVNO-LÁTKOVÝ LASER

Součástí pevnolátkového laseru je:

- Laserová hlavice obsahující aktivní materiál, budící elementy, budící dutinu a otevřený rezonátor.
- Zdrojová jednotka.
- Chladicí jednotka.



Obr.4.: Součásti pevnolátkového laseru.

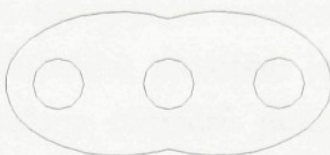
Z důvodu velkých ztrát se krystal a budící výbojka umísťují do tzv. *budící dutiny*, která má za úkol koncentrovat a odrážet co nejvíce světla vyzařovaného výbojkou na aktivní prostředí.

Používají se následující tvary dutin:

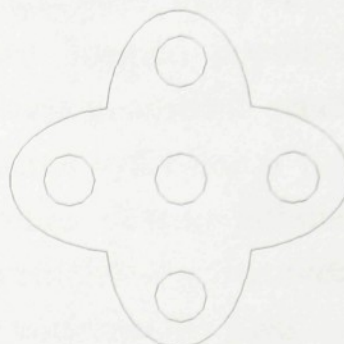
JEDNOELIPSA



DVOUELIPSA



MULTIELIPSA



Obr.5.: Budící dutiny.

2.6. PLYNOVÉ LASERY

Aktivní prostředí je tvořeno plynem nebo směsí plynů. Nejpoužívanější typy buzení u plynových laserů jsou buzení doutnavým výbojem, elektronovým svazkem a adiabatickou expanzí. Doutnavý výboj je sloupec ionizovaného plynu, který vznikne přivedením dostatečně vysokého napětí na konce elektrod.

Plynné aktivní prostředí lze také budit srážkami s elektrony přicházejícími s urychlovače. Dalším mechanismem buzení je relaxace vzbuzených molekul plynu při průchodu tryskou. Před vstupem do trysky se plyn ohřívá např. v elektrickém oblouku. Na výstupu z trysky dochází k rychlému ochlazení „zamrzání“ hladin s pomalou relaxací a naopak k vyprazdňování nízkopoložených energetických hladin, což vede k inverzní populaci v určitém objemu plynu těsně za tryskou. K buzení se také může použít jiný laser např. se používají infračervené lasery.

Většina plynových laserů pracuje v kontinuálním režimu. To znamená, že laser dodává záření nepřetržitě. Naopak při impulsním režimu je energie dodávána pouze v krátkých časových impulsech, u kterých však lze dosáhnout značně vysokých výkonů.

2.7. POLOVODIČOVÉ LASERY

Jako aktivní prostředí se používají polovodiče s tzv. přímými zonálními přechody. Příliš se nehodí nejběžnější polovodiče Ge, Si, G a P. Nejběžněji se používá polovodiče GaAs s příměsí atomů (Se, Te) a akceptorů (Si, Ge, Cd, Zn). Další materiály aktivního prostředí jsou např. InAs, InSb, PbS.

Výhodou použití polovodičových struktur pro inverzní populaci je miniaturizace a snížení energetické náročnosti. Hodnota zesílení vztažená na jednotku objemu aktivního prostředí je podstatně vyšší než u jiných laserů. Rezonátor dosahuje rozměrů pouze několika desetin milimetru. Valenční a vodivostní pásy jsou odděleny potenciálovou bariérou a k dosažení vodivosti musíme elektrony vzbudit do vodivostního pásu.

K buzení se používá injektování proudu přes přechod PN polovodiče, nebo se může použít optické buzení, kdy se budící záření zaostřuje na povrch polovodiče válcovou čočkou. Protože je zde dosaženo velkého zesílení, postačí jako odrazné plochy rezonátoru rovnoběžné konce krystalu.

Vyrábí se lasery pracující v impulsním i kontinuálním režimu, jejichž výkony jsou uvedeny v tabulce č.3..

2.8. KAPALINOVÉ LASERY

Aktivní prostředí tvoří roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných zemin. Speciální kapaliny jsou roztoky metalo-organických sloučenin, např. vodní roztoky solí s aktivními ionty Gd^{3+} , Eu^{3+} , Tb^{3+} , Nd^{3+} , Er^{3+} nebo Ho^{3+} . Výhodou těchto laserů je velké pásmo přeladitelnosti. Volbou barviva můžeme dosáhnout přibližného nastavení vlnové délky emitovaného záření. K jemnému nastavení se používá rozpouštědlový efekt.

Použitá rozpouštědla:

- dimethylformamid
- ethylalkohol
- dioxan
- polymethylmetakrylát (pryskyřice)
- toluen

Buzení těchto laserů je prakticky výhradně optické. Pro buzení se používá výbojek se strmým náběhem, nebo pulsní lasery s krátkými impulsy.

K impulsnímu buzení se používá buď impulsních výbojek, anebo jiných laserů (argonového, dusíkového, excimerového). Mohou být použity k buzení také vyšší harmonické frekvence laserů např. rubínového, Nd:YAG, Nd-skel laseru. Při buzení výbojkou je dobré volit koncentraci barviva tak, aby byl celý prostor pokud možno homogenně ozářen. Největší energie se dosahuje při buzení výbojkou. Nevýhodou je ohřívání roztoků při ozařování.

2.9. CHEMICKÉ LASERY

Prostor, který tvoří aktivní prostředí je naplňován směsí plynů helia a molekulárního fluoru a směsí oxidu dusnatého a plynu CO_2 .

Kontinuální lasery se konstruují jako průtočné, protože při každém laserovém záblesku se reaktor vyprázdňuje a musí se znovu naplnit.

Zde přispívá k buzení aktivního prostředí energie, uložená v chemické vazbě.

Typy reakcí, při nichž dochází k inverzní populaci jsou:

- fotoeliminační
- fotodisociační
- výměnná
- abstrakční
- řetězová
- insertně-eliminační
- adičně-eliminační
- radikálově-rekombinační
- radiačně-asociační

Pro impulsní chemické lasery se k iniciaci používá impulsní výbojky. Záření z této výbojky způsobí disociaci reaktantů ve volné radikály, které spustí řetězovou reakci. Kontinuální provoz využívá příčného toku reagujících složek tryskou.

K disociaci lze použít rázovou vlnu, ohřev v obloukovém výboji, elektrický výboj. Nevýhodou jsou vysoce agresivní reakční složky a produkty reakcí.

Chemické lasery pracují jak v kontinuálním, tak i v impulsním režimu.

2.10.EXCIMEROVÉ LASERY

Aktivním prostředím excimerových laserů jsou excimery. *Excimer* – je to excitovaný dimer, jinými slovy molekula vytvořená ze dvou stejných atomů (popř. molekul). Elektronově excitované atomy vzácných plynů mohou vytvářet s jinými atomy chemicky vázaný dimer – *excimer*.

Při buzení a generaci dochází k tvorbě a rozpadu chemických vazeb. K buzení horní laserové hladiny však není energie chemické reakce využívána. Využívá se energie excitovaného komplexu – *exciplexu*, což je systém Xe_2 buzený intenzivním elektronovým svazkem v kapalném xenonu. Používají se příměsi vzácných plynů (např. Ar_2) a halogenů (např. KrF) s koncentrací 0,1 až 0,5%.

Pro excimerové lasery se používá zásadně pulsní buzení např. elektronovým svazkem nebo elektrickým výbojem. Umístěním takto excitovaného plynu do F-P rezonátoru získáme laser generující na vlnové délce fluorescence.

Excimerové lasery jsou nejvýkonnější zdroje ultrafialového a vakuového ultrafialového záření.

2.11.LASER S VOLNÝMI ELEKTRONY

Aktivní prostředí tohoto laseru tvoří modulovaný svazek elektronů. Elektrony urychlené urychlovačem na energii 40 [meV] procházejí soustavou magnetů, jejichž polarita se střídá. Jestliže proces proběhne v klasickém rezonátoru, vznikne koherentní záření podobné emitovanému lasery.

Účinnost tohoto zařízení je velká, a jeho výhoda je v možnosti širokého přeladování vlnových délek.

2.12.CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY LASERŮ

V následujících tabulkách jsou uvedeny základní charakteristické vlastnosti jednotlivých typů laserů, které se využívají při volbě a návrhu použitého laseru. Lasery jsou uspořádány v tabulkách podle skupenských stavů materiálu aktivního prostředí.

Tab.2. Charakteristické hodnoty pevno-látkových laserů.

PEVNOLÁTKOVÉ LASERY			
Název laseru	Délka rezonátoru [cm]	Vlnová délka [nm]	Výkon laseru [W]
Rubínový laser	5 až 15	694,3	Impulsní - 10 ¹²
Nd:YAG laser	3	1064,1	Kontinuální – 100 až 200
Nd:sklo laser	10	1062,3	Rádově 100

Tab.3. Charakteristické hodnoty plynových laserů.

PLYNOVÉ LASERY			
Název laseru	Délka rezonátoru [cm]	Vlnová délka [nm]	Výkon laseru [W]
Helium-neonový laser	10 až 200	633 až 3391	10 ⁻⁶ až 0,1
Argonový laser	300	260 až 1000	500
Helium-cadmiový laser		441,6	0,01 až 0,05
CO ₂ – laser	100	10600	100 až 10 ⁴
TEA CO ₂ – laser	50	8000 až 11000	Špičková hodnota 20*10 ⁶
Dusíkový laser	Rádově desetiny	337,1	10 ⁵ až 10 ⁶

Tab.4. Charakteristické hodnoty polovodičových laserů s různými aktivními prostředími.

Materiál aktivního prostředí	Vlnová délka [nm]	Výstupní výkon [W]	
		Kontinuální	Impulsní
GaAs	830 až 920	0,2 až 12	5 až 100
InAs	3100 až 3200	0,05	0,1 až 0,2
Pb _x Sn _{1-x} Te	9000 až 11000	0,05	0,1
InSb	5200	-	-
PbS	4,3	-	-
Al _x Ga _{1-x} As	660 až 770	0,05	-

Tab.5. Charakteristické hodnoty barvivových laserů v závislosti na použitém rozpouštědle.

Použité rozpouštědlo	Vlnová délka [nm]	Kontinuální výkon [W]
Dimethylformamid	428 až 430	10
Ethylalkohol	421	
Dioxan	416 až 418	
Polymethylmetakrylát ¹	415	

¹ – pevný roztok (pryskyřice)

Tab.6. Délka aktivního prostředí a výkon ostatních laserů.

Typ laseru	Délka aktivního prostředí [cm]	Výstupní výkon [W]
Chemický laser	24	15000
Excimerový laser	-	Řádově desítky
Laser s volnými elektrony	-	Řádově jednotky

/1/, /2/

2.13.APLIKACE LASERŮ

2.13.1. VYUŽITÍ K OPTICKÉMU OHŘEVU

Energie dopadající na povrch látky se z části odráží a z části pohlcuje. Pohlcená část záření proniká do povrchové vrstvy materiálu, přičemž hloubka průniku závisí na vodivosti materiálu a frekvenci záření.

Varianty optického ohřevu:

- rychlý impulsní ohřev s rychlým chladnutím
- rychlý impulsní ohřev s teplotní prodlevou
- plošný homogenní ohřev

Laserů se používá k transformačnímu zpevnění, což je operace podobná kalení. Laserovým svazkem se zakalí pouze tenká povrchová vrstva bez prohrátí a změn vlastností jádra materiálu.

K ohřevu se používá např. CO₂ – laser s výkonem několika [kW].

Příklady použití ohřevu:

- povrchová úprava pro zvýšení odolnosti proti korozi
- kalení ostří nástrojů s rychlořezné oceli
- kalení značně namáhaných součástí např. klikové a vačkové hřídele, boky ozubených kol, stěny válců spalovacích motorů
- sváření běžné oceli do tloušťky 12 [mm], nerezavějící oceli do tloušťky 10 [mm], titanové slitiny, hliník apod.

- sváření objektů mikroskopické velikosti
- sváření nesusoudržných materiálů např. kov-plast, kov-keramika
- sváření součástí značně rozdílných velikostí
- legování materiálu
- popouštění
- nitrídování
- pěstování monokrystalů
- výroba optických vláken
- tavení těžce tavitelných materiálů např. safíru nebo karbidu titanu
- úpravy polovodičových materiálů žíhání
- pro vytvrzování akrylátů ve stereolitografii
- leptání a pokovování povrchu materiálu

2.13.2. *OBŘÁBĚNÍ LASEROVÝM SVAZKEM*

Hustota záření vyslaného laserem může dosáhnout takové hustoty, že může dojít k odpaření materiálu, což je ovlivňováno několika faktory jako jsou odrazivost materiálu, tepelná kapacita, tepelná vodivost a výparné teplo. U kovů je výhodnější používání impulsních laserů.

Příklady použití principu odpařování materiálu pomocí laserového záření:

Pro čištění:

- čištění soch, architektonických památek, fresek
- čištění kovových materiálů, keramiky, dřeva a dokonce i tkanin

Jako nástroje pro obrábění se laser používá k:

- vrtání malých otvorů, vrtání do nekovových materiálů např. rubínu
- vrtání otvorů průvlaků do diamantů, vrtání do křemene, vrtání do skla
- dekorování skla (CO_2 – laser s výkonem několika stovek wattů)
- řezání materiálu (Nd:YAG, CO_2 lasery s výkonem přesahujícím 1 [kW])
- nastavení odporů vypalováním drážek v odporových vrstvách
- gravírování

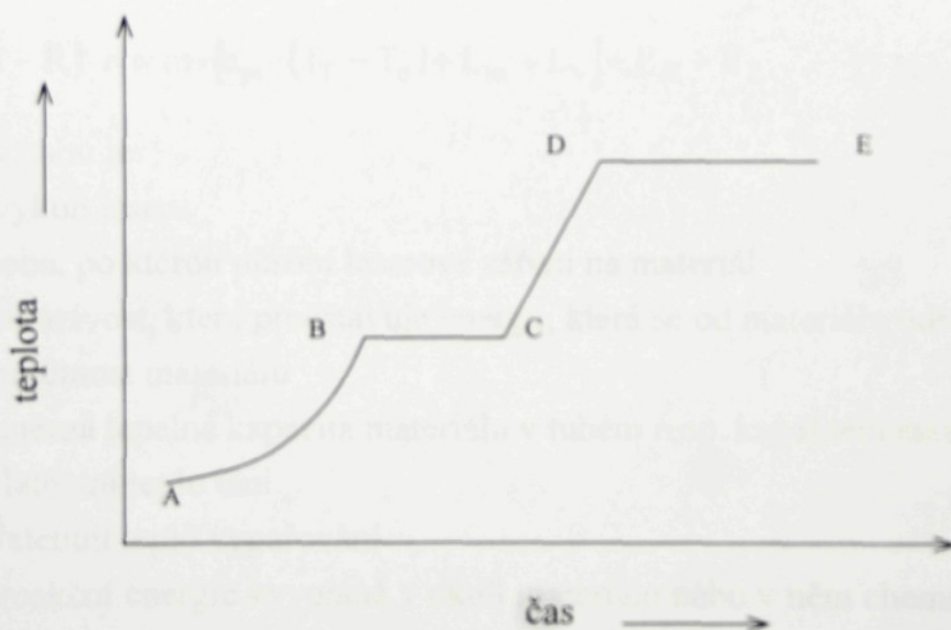
3. TEPELNÉ ÚČINKY PAPRSKŮ LASERU

Při tepelném zpracování laserem rozlišujeme následující stádia interakce laserového paprsku a zpracovávaného kovu [3] :

- přívod laserového záření k materiálu
- pohlcení světelného toku a předání jeho energie materiálu
- ohřev materiálu bez viditelného poškození
- roztavení materiálu
- vypaření kovu
- vychladnutí materiálu po přerušení záření

Vlastní proces ohřívání kovového materiálu lze rozdělit do tří etap (viz. obr.6.) :

- v prvním intervalu se nachází kov v tuhém stavu
- druhý interval je specifický vlastním tavením kovu
- ve třetím intervalu probíhá ohřívání v tekutém stavu
- čtvrtý interval je charakteristický odpařováním kovu



Obr.6.: Proces ohřívání kovového materiálu.

Při dopadu záření na povrch materiálu platí zákon zachování energie /4/:

$$R + A + T = 1, \quad (9)$$

kde R je odrazivost, A je absorpce a T je transmitance (propustnost).

Tyto tři veličiny, které charakterizují proces působení záření na materiál můžeme vyjádřit :

$$A = \frac{I_{\text{poh}}}{I_o} \quad (10)$$

$$R = \frac{I_{\text{odr}}}{I_o} \quad (11)$$

$$T = \frac{I_{\text{prop}}}{I_o} , \quad (12)$$

kde I_o je celková intenzita dopadajícího záření a $I_{\text{poh,odr,prop}}$ jsou intenzity pohlceného, odraženého a prošlého záření.

Celkovou energetickou bilanci interakce laserového záření s materiálem lze popsat rovnicí /5/ :

$$(1 - R) \cdot P = m \cdot [c_{\text{ps}} \cdot (T_T - T_o) + L_m + L_v] + E_R + E_Z \quad (13)$$

v tomto vztahu je

P ... výkon laseru

t ... doba, po kterou působí laserové záření na materiál

R... odrazivost, která představuje energii, která se od materiálu odráží

m... hmotnost materiálu

c_{ps} ... měrná tepelná kapacita materiálu v tuhém resp. kapalném stavu

L_m ... latentní teplo tání

L_v ... latentní teplo vypařování

E_R ... reakční energie vyvolaná v okolí materiálu nebo v něm chemickou reakcí

E_Z ... ztrátová energie, která se rozptýlí

Tepelné zpracování laserem přináší následující výhody:

- protože světlo nemá setrvačnost, je zaručena vysoká rychlost spouštění a vypínání laseru, což vede k vysoké produktivitě
- dochází k velmi malé deformaci zpracovávaných součástí
- je možné zpracovávat jen určitou část povrchu
- snadnější zpracování složitých ploch
- plošného zakalení může být dosaženo s nepatrným znečištěním povrchu
- není nutné vnější ochlazování (pouze u malých součástí)
- celý proces může být řízen přes počítač
- proces funguje v atmosféře a to i ve velkých vzdálenostech od zpracovávaného povrchu
- po kalení již nejsou nutné další operace pro zlepšení povrchu

3.1. FYZIKÁLNÍ PODSTATA LASEROVÉ TECHNOLOGIE

Absorpce energie laserového záření je závislá nejen na vlastnostech laserového paprsku, ale i na vlastnostech absorbujícího materiálu.

Parametry ovlivňující absorpci záření materiálem :

1. Parametry laserového paprsku :

- intenzita E
- vlnová délka λ
- délka impulsu t
- rozbíhavost Θ

2. Parametry čočky :

- ohnisková vzdálenost

3. Minimální průměr stopy.

4. Povrch materiálu a s tím související odrazivost.

5. Vlastnosti materiálu :

- Absorpce A
- tepelná vodivost λ_t
- hustota ρ

3.1.1. INTENZITA ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY

Elektromagnetická vlna je popsána vektorem intenzity elektrického pole E a vektorem magnetické indukce B . Jestliže má být elektromagnetická vlna modelem světla, musí uvažovat o kmitech s frekvencí $f = 10^{15}$ [Hz].

V každém zvoleném čase $t = t_0$ je intenzita el. pole harmonickou funkcí prostorové souřadnice z a je dána vztahem :

$$\vec{E} = \vec{i}_y \cdot E_0 \cdot \cos(k \cdot t + \Phi_0), \quad (14)$$

kde je E_0 je amplituda elektrického pole, k je vlnové číslo, $k = \omega/c$, kde c je rychlost světla ve vakuu, $c = 299792458 \text{ [ms}^{-1}\text{]}$, Φ je fázová konstanta, ω je kruhová frekvence vlny a pro Φ_0 platí vztah :

$$\Phi_0 = -\Phi - \omega \cdot t_0. \quad (15)$$

3.1.2. VLNOVÁ DÉLKA

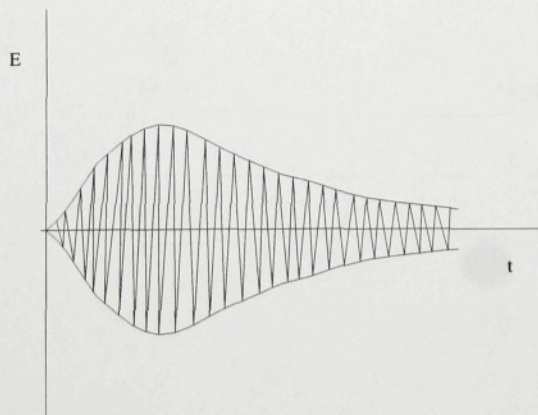
Vlnová délka je prostorová perioda harmonické funkce (14) a je dána vztahem :

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi \cdot c}{\omega} = \frac{c}{f} \quad (16)$$

Tento vztah platí za podmínky, že $v = c$, kde v je fázová rychlost kterou se vlnoplocha pohybuje ve volném prostoru.

3.1.3. DÉLKA IMPULSU

Časový interval, ve kterém je hustota výkonu v daném bodě prostoru nenulová, se nazývá doba trvání impulsu nebo *délka impulsu*.



Obr.7.: Impuls optického záření.

Impuls optického záření může být popsán intenzitou elektrického pole :

$$\vec{E} = \vec{i}_y \cdot \varepsilon_0(t) \cdot \cos(\omega \cdot t + \Phi(t)) , \quad (17)$$

kde $\varepsilon_0(t)$ a $\Phi(t)$ jsou amplituda a fáze.

Intenzita záření (plošná hustota výkonu) I je přímo úměrná druhé mocnině amplitudy :

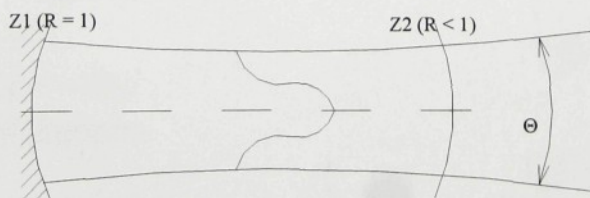
$$I = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot c \cdot \varepsilon_0(t)^2 , \quad (18)$$

kde $\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} [\text{Fm}^{-1}]$ je permitivita vakua.

/2/

3.1.4. ROZBÍHAVOST

S průběhem elektromagnetického pole v rezonátoru souvisí parametry záření vystupujícího z rezonátoru polopropustným zrcadlem. Záření vystupuje ve svazku s mírnou rozbíhavostí ve formě protáhlého kužele s vrcholovým úhlem Θ .



Obr.8.: Průběh intenzity záření. /1/

3.1.5. ODRAZIVOST

Odrazivost je významný činitel, který má vliv na absorpci materiálu. Čím je odrazivost větší, tím menší je absorpce a tím menší je ohřev materiálu. U kovů je odrazivost značně velká. Příčinou toho je uvedení nezávislých volných elektronů v kovu do vynucených kmitů působením dopadajícího světla. Jimi vytvořené vlny se skládají s dopadajícími, takže procházející vlna se zruší a téměř všechno světlo se odráží. Část energie se přemění v teplo. Tato část je tím větší, čím menší má kov elektrickou vodivost [7]. Odrazivost závisí také na indexu lomu a indexu absorpce kovu, na úhlu dopadu a vlnové délce světla. Odrazivost při úhlu 90° je dána vztahem :

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} , \quad (19)$$

kde R je odrazivost, n je index lomu a K je index absorpce kovu.

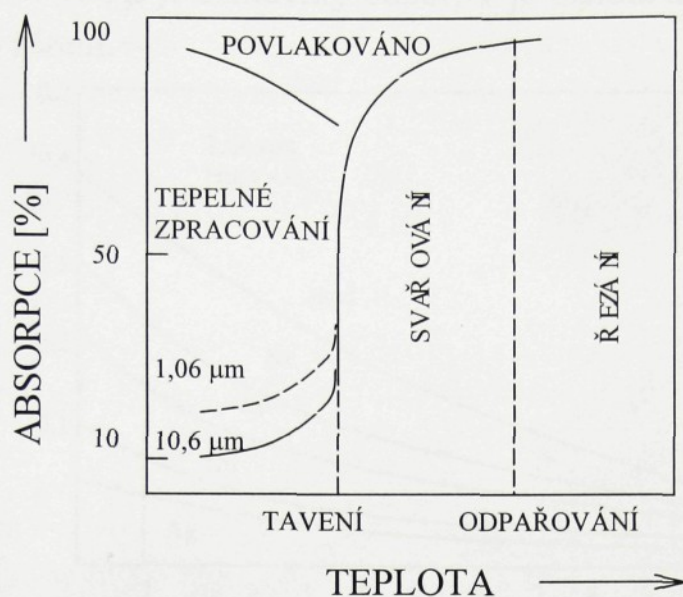
S rostoucí vlnovou délkou odrazivost roste.

3.1.6. ABSORPCE

Na absorpci energie je založen výpočet přenosu tepla při laserových procesech. Dodržení absorpčních vlastností povrchů je pro výsledek ozáření důležitější, než přesné dodržení rychlosti posuvu a konstantního výkonu laseru.

Absorpce je závislá na :

- druhu materiálu
- odrazivosti
- teplotě povrchu
- drsnosti povrchu



Obr.9.: Závislost absorpce na teplotě.

Laserové záření je pohlcováno povrchovou vrstvou. Tento jev popisujeme vztahem /8/ :

$$dI = -\alpha \cdot I \cdot dx \quad (20)$$

což po integraci dává :

$$I = I_0 \cdot e^{(-\alpha \cdot x)}, \quad (21)$$

kde α je koeficient absorpce záření, I je intenzita záření v hloubce x a I_0 je intenzita dopadajícího světelného toku.

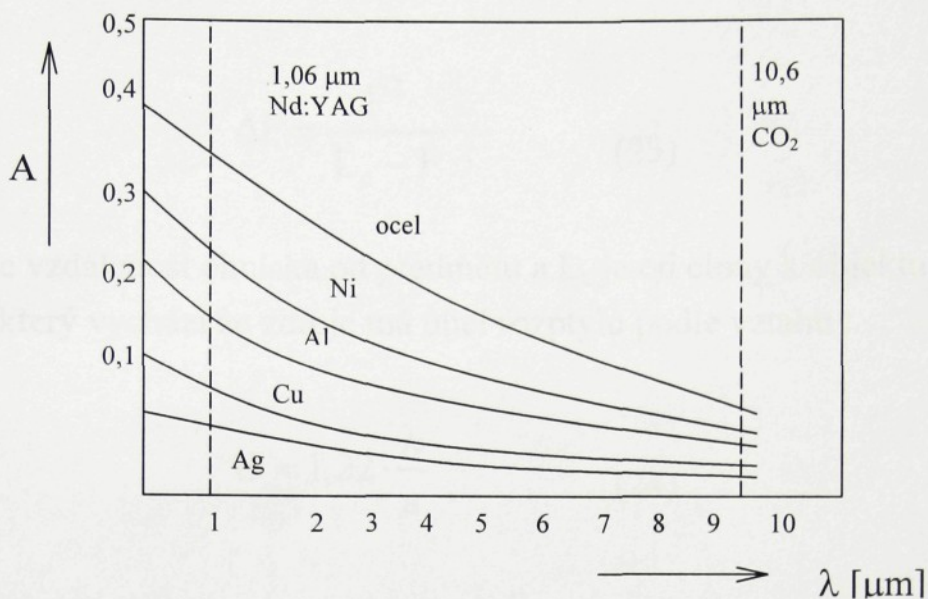
U kovu je absorpce rovna :

$$A = \frac{4n}{(n+1)^2 + K^2} \cdot \quad (21)$$

Řešením vztahů pro koeficient absorpce dostáváme :

$$A = \text{konst} \cdot \sqrt{\frac{\rho(T)}{\lambda}}, \quad (22)$$

kde A je pohltivost, ρ je elektrický odpor, T je teplota a λ je vlnová délka dopadajícího záření.



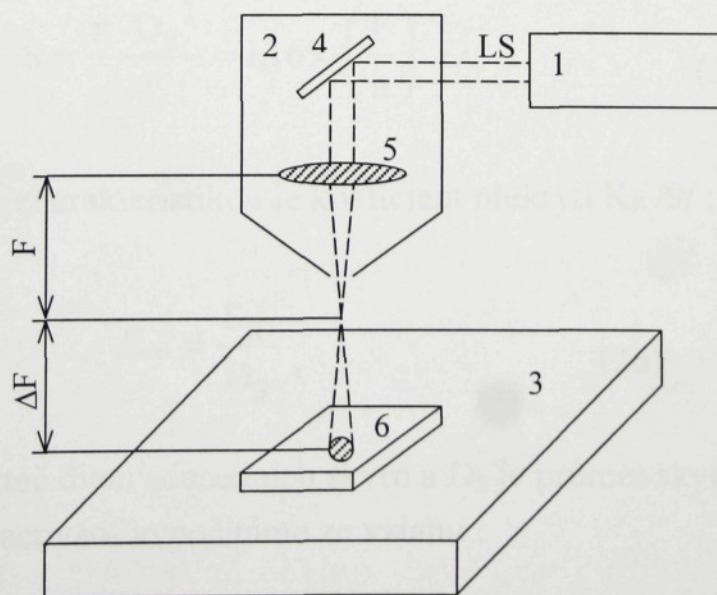
Obr.10.: Závislost absorpce na vlnové délce.

/8/

3.2. PRINCIPIÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ A OBECNÉ VZTAHY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ

Laserové vytvrzování je tepelné zpracování materiálů, které k rychlému ohřevu využívá optické záření laserů.

Na následujícím obrázku je znázorněno zařízení pro vytvrzování.



Obr.11.: Schéma zařízení pro vytvrzování.

1 – zdroj záření, 2 – hlava s optikou, 3 – stůl, 4 – zrcadlo, 5 – čočka, 6 – zpracovávaný materiál

Vzdálenost zpracovávané plochy je předem stanovena z ohniskové vzdálenosti F a průměru vystupujícího paprsku a je dána vztahem /9/ :

$$\Delta F = \frac{F^2}{L_c - F} , \quad (23)$$

kde ΔF je vzdálenost ohniska od předmětu a L_c je od clony k objektu. Svazek, který vychází ze zdroje má úhel rozptylu podle vztahu :

$$\Theta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{a} , \quad (24)$$

kde λ je vlnová délka a a je apertura zrcadla.

Minimální průměr skvrny, kterého můžeme dosáhnout, vychází ze vztahu :

$$D_S = F \cdot \Theta = F \cdot \frac{1,22}{a} \cdot \lambda , \quad (25)$$

a potom pro plochu skvrny :

$$S = \frac{\pi \cdot D_S^2}{4} = 1,169 \cdot \left(\frac{F}{a} \right)^2 \cdot \lambda^2 , \quad (26)$$

Důležitou charakteristikou je koeficient překrytí K_P /9/ :

$$K_P = \frac{S_R}{D_S} , \quad (26)$$

kde S_R je rozteč dvou sousedních skvrn a D_S je průměr skvrny.

Rychlost zpracování vypočítáme ze vztahu :

$$v_z = \frac{L_z}{t} = \frac{n_I \cdot D_S \cdot K_P}{t} , \quad (27)$$

kde L_z je délka zpracovávaného místa, t je doba zpracování a n_I je množství impulsů.

Při impulsním režimu zpracování je četnost výskytu impulsů dána vztahem:

$$f_I = \frac{n_I}{t} . \quad (28)$$

Po dosazením do vztahu (27) dostaneme :

$$v_z = D_S \cdot K_P \cdot f_I \quad (29)$$

a dosazením (26) do (29) dostaneme :

$$v_z = S \cdot f_I . \quad (30)$$

Potom lze výkonnost tohoto procesu vyjádřit vztahem :

$$P = \frac{\pi \cdot D_S^2}{4} \cdot K_P \cdot f_I . \quad (31)$$

Hloubka vytvrzené vrstvy bude záviset na délce doby ozáření materiálu t_P , na průměru plošky D_S a na rychlosti posuvu v_P .

Při přibližném výpočtu můžeme vycházet ze vztahu :

$$h = \sqrt{\lambda_t \cdot t_P} \quad (32)$$

$$t_P = \frac{D_S}{v_P} , \quad (33)$$

kde λ_t je tepelná vodivost materiálu.

Pro přesnější výpočet platí vztah :

$$h = \sqrt{\frac{8 \cdot \lambda_t \cdot r_S}{v_P \cdot \pi}} - \frac{\pi \cdot \lambda_t \cdot c \cdot r_S^2 \cdot \rho \cdot T_o}{\alpha \cdot q} , \quad (34)$$

kde T_0 je teplota fázových přeměn, q je plošná hustota výkonu, ρ je hustota materiálu, α je koeficient pohltivosti, r_s je efektivní rozměr svazku paprsků a c je měrná tepelná kapacita materiálu.

3.3. VYTVRZOVÁNÍ KOVŮ – KALENÍ

Laserové kalení se používá především pro tzv. transformační zpevnění např. namáhaných automobilových součástí. Používají se zpravidla CO_2 lasery o výkonu několika [kW].

Při tepelném zpracování litiny můžeme použít lasery s následujícími charakteristickými hodnotami /10/ :

- aktivní prostředí CO_2
- výkon laseru 700 [W]
- průměr skvrny 0,7 – 1 [mm]
- hustota výkonu 10^5 [W/cm²]
- rychlost posuvu paprsku 0,1 – 5,0 [m/min]

Kalení ploch laserem lze provést jak sférickou, tak i cylindrickou optikou. Pro vytvoření zakalené plochy je nutné vhodně překrývat laserové impulsy.

3.4. VYTVRZOVÁNÍ AKRYLÁTŮ A JINÝCH PLASTICKÝCH HMOT

Při vytvrzování akrylátů je princip technologie založen na ohřevu materiálu pomocí laseru, jako je tomu i u vytvrzování kovových materiálů. Vztahy použité pro výpočet jednotlivých charakteristických hodnot při vytvrzování kovů je možné použít i pro výpočet hodnot u akrylátů. Podstatný rozdíl je v typu použitého laseru a jeho výkonu, protože k vytvrzování kovů se používají lasery s výkony několika desítek wattů a k vytvrzování akrylátů naopak lasery s výkonem několika miliwattů. Tento rozdíl výkonů je způsoben tím, že kovy mají daleko větší odrazivost než akryláty, takže je potřeba k vytvrzení podstatně větší intenzita záření. Další odlišnou vlastností, která ovlivní intenzitu záření je teplota tavení obou materiálů. Čas potřebný pro vytvrzení akrylátů je mnohem kratší než u vytvrzování kovu.

Pro zpracování těchto materiálů se používají moderní technologie tzv. *Rapid prototypingu*. Mezi nejpoužívanější technologie patří :

1.SLA - STEREOLITHOGRAPHY (STEREOLITOGRAFIE)

Stereolitografie je nejrozšířenější metodou RP. Byla vyvinuta společností 3D Systems, Inc.. Jako materiálu se používá tekutého polymeru, který se vytvrzuje dopadem UV laserového paprsku.

Popis výrobního procesu:

Na začátku se vana naplní tekutým polymerem. Pohyblivá deska je nastavena těsně pod hladinu ve vzdálenosti, která odpovídá tloušťce vrstvy. Laser vytvrdí polymer v oblastech odpovídajících obrysu 2D tvaru vrstvy. Pohyblivá deska se posune dolů o vzdálenost odpovídající tloušťce vrstvy. Přes hladinu přejede čistící vozík, který zajistí dokonalou plochost hladiny polymeru. Tento postup se opakuje až do dokončení celé součásti. Je nezbytné použít podpurných struktur, které zvýší tuhost součásti a zabrání případným místním přesahům. Po vyjmutí z vany jsou tyto struktury obvykle odstraňovány ručně.

V tab.8. jsou uvedeny materiály používané firmou 3Dsystems a charakteristické parametry strojů používaných pro SLA.

Tab.7. Charakteristické hodnoty strojů firmy 3Dsystems.

Materiál	Typ stroje	Typ laseru	Výkon laseru [mW]	Vlnová délka [nm]
SL 5170 SL 5210 SL 5220	SLA 250/50HR SLA 250/50 SLA 250/40	HeCd	6 24 12	325
SL 5190 SL 5510 SL 5520 SL 5530	SLA 3500	Nd:YVO ₄	160	354,7
SL 5195 SL 5510 SL 5520 SL 5530	SLA 5000	Nd:YVO ₄	216	354,7
SL 7510	SLA 7000	Nd:YVO ₄	800	354,7

2.SLS - SELECTIV LASER SINTERING (SPÉKÁNÍ LASEREM)

Výrobou a prodejem tohoto systému se zabývá především společnost DTM Corp. SLS umožňuje použití různých druhů práškových materiálů, které jsou účinkem laseru slinovány.

Popis výrobního procesu:

Na pracovní desku je válečkem rozprostřen předeřtý prášek. Působením laseru dojde ke zvýšení teploty a tím i ke slnutí prášku v dané vrstvě. Tento jednoduchý postup se opakuje až do úplného vyhotovení modelu.

Při použití tohoto systému není nutno použít podpůrné struktury.

Materiály vhodné k použití:

Nylon a Fine Nylon - je běžný termoplast. Má dobrou odolnost proti působení tepla a chemikálií, je trvanlivý. Používá se pro výrobu prototypů, může být vrtán a spojován s jinými částmi.

ProtoForm Composite - Je kompozit vyvinutý společností DTM. Sestává se z nylonu a malých kulovitých částeczek skla. Má podobné vlastnosti jako nylon, navíc může být otryskáván pískem pro zlepšení povrchu. Používá se pro výrobu prototypů a funkčních modelů.

Polykarbonát - je termoplast k běžnému použití. Má dobrou trvanlivost a je tepelně odolný. Je vhodný pro použití metodou spalitelného modelu. Používá se k výrobě koncepčních modelů a vzorů pro lití do písku, lití metodou spalitelného modelu a k výrobě forem.

TrueForm PM Polymer - Je polymer obsahující malé kulovité částčky. Byl vyvinut společností DTM Corporation. Je vhodný pro výrobu přesných vzorů pro výrobu forem a odlévání metodou spalitelného modelu - obzvláště v případě tenkých stěn modelu a jeho značné geometrické složitosti.

RapidSteel Metal - Je materiál obsahující částčky uhlíkové oceli potažené polymerem. Je velmi trvanlivý a je vhodný pro výrobu součástí, u kterých je požadována velká přesnost. Používá se především pro výrobu jader vstřikovacích forem.

3.LOM – LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LAMINOVÁNÍ)

Tento systém byl vyvinut americkou firmou Helysis. Systém pracuje na principu vrstvení tenkých fólií z papíru, nylonu nebo polyesteru.

Popis výrobního procesu:

Na pracovní desku je natažena fólie, z níž je laserem vyříznut příslušný tvar. Pracovní deska se posune směrem dolů a je na ní natažena další fólie. Přes ní přejede horký válec, který způsobí tlakem a teplem přilepení nové vrstvy k vrstvě předchozí. Znové vrstvy je opět laserem vystřižen příslušný tvar. Tento postup se opakuje až do úplného zhotovení modelu. Jelikož tloušťka fólie není konstantní, je použito sensoru, který jí měří. Podle této hodnoty počítač koriguje rozložení modelu na jednotlivé vrstvy. Části obsahující přebytečný materiál jsou pro snazší odstranění laserem šrafovány. Není nutno používat podpůrné struktury ani následné upravení modelu.

Přehled používaných materiálů:

LPH LOMPapers - LPH je nosný papír s vysokou pevností potažený adhezivem pro tepelné lepení. Nízká aktivační teplota a viskozita umožňují vytvářet součásti bez pnutí. Dostupné šířky: 356mm; 610mm ; 711mm. Tloušťka se pohybuje od 0,107mm do 0,200mm.

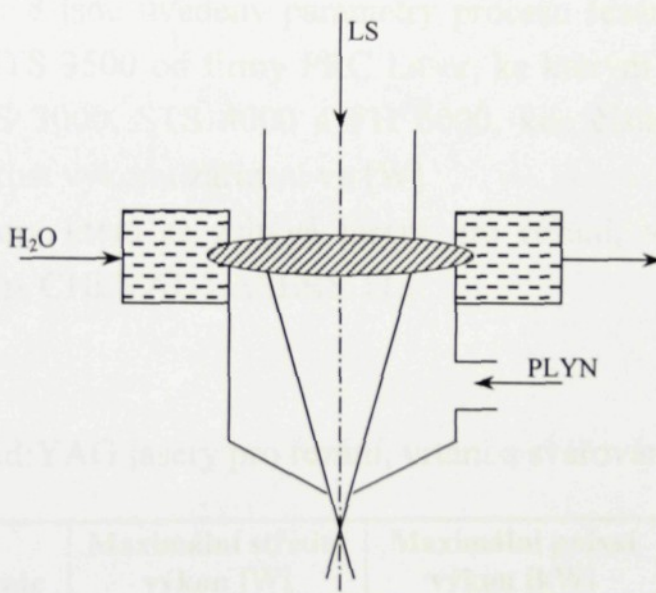
LPS LOMPaper - LPS je bělený sulfátový nosný papír potažený polyetylenovým adhezivem o nízké hustotě. Dostupné šířky: 343mm ; 457mm ; 686mm. Tloušťka je 0,097mm.

3.5. ŘEZÁNÍ LASEREM

Laserové řezání se používá v případě, kdy potřebujeme oddělit materiál s malou tepelnou vodivostí. Snažíme se co nejrychleji odpařit materiál z místa řezu, aby byla oblast řezu co nejméně zasažena tepelnými účinky.

Pro řezání materiálu se používají kontinuálně pracující Nd:YAG, resp. CO₂ lasery. Při řezání se pohybuje buď laserový svazek po obrobku, nebo častěji obrobek vůči svazku.

Při řezání se do zaostřovací hlavičky vhání pod tlakem plyn, který může řezání urychlit buď zvýšeným spalováním (např. kyslík při řezání oceli), nebo se jím vytlačuje tavenina z řezu (dusík, argon). Plyny mohou sloužit i k ochlazování.



Obr.12.: Schéma zaostřovací hlavičky CO₂ laseru s chlazením čočky vodou a připouštěním plynu (LS – laserový svazek). /1/

Při řezání kovů musíme používat lasery s kontinuálním výkonem nejméně 100 [W]. Rychlost řezu závisí na vlastnostech materiálu, jeho druhu a druhu přídavného plynu.

Tab.8. Závislost rychlosti řezání na výkonu zařízení a použitém plynu. /12/

Řezaný materiál	Výkon zařízení [W]	Použitý plyn, tlak plynu [bar]	Rychlost řezání [m/min]	Tloušťka řezané vrstvy [mm]
Měkká ocel	2200	O ₂ , 1	3,1	4
Měkká ocel	3500	O ₂ , 1	3,0	
Nerezová ocel	2200	O ₂ , 7	1,7	
Nerezová ocel	3500	O ₂ , 7	2,5	
Nerezová ocel	2200	N ₂ , 10	2,0	
Nerezová ocel	3500	N ₂ , 10	2,5	
Hliník	2200	Vzduch, 10	0,9	
Hliník	3500	Vzduch, 10-12	2,4	

V tabulce č.8 jsou uvedeny parametry procesu řezání pomocí zařízení STS 2200 a STS 3500 od firmy PRC Laser, ke kterým dále patří zařízení SE 1000, STS 3000, STS 4000 a FH 6000, kde čísla uvedená v názvu vyjadřují velikost výkonu zařízení ve [W].

Další firmou, která se zabývá lasery pro řezání, vrtání, svařování a značení je firma CHEVAL LASERS. /13/

Tab.9. Nd:YAG lasery pro řezání, vrtání a svařování.

Označení laserového zdroje	Maximální střední výkon [W]	Maximální pulsní výkon [kW]	Maximální pulsní energie [J]
100 P kompaktní	100	4	20
175 P kompaktní	175	6,5	40
300 C kompaktní	300	Kontinuální laser	
400 P kompaktní	400	7	40
500 C modulový	500	Kontinuální laser	
600 C modulový	600	Kontinuální laser	
750 P modulový	750	14	80
1100 P modulový	1100	20	120
1500 P modulový	1500	24	150

P ... pulsní

C ... kontinuální

Tab.10. Lasery pro značení.

Typ laseru	Označení	Jmenovitý výkon [W]
Nd:YAG	CF 11-60	60
Nd:YAG	CF 11-75	75
Nd:YAG	CF 11-50 D	50
Nd:YAG	CF 11-25 DF	25
CO ₂	CF 25 CO ₂	25
CO ₂	CF 50 CO ₂	50

/1/

Např. pro řezání ocelové desky tloušťky 20 [mm] můžeme použít kontinuální CO₂ laser o výkonu 6 [kW] při rychlosti řezání 1 [m/min]. Podobně lze řezat nerezavějící oceli, titanových a jiných slitin. Okraje řezu jsou čisté, materiál v okolí řezu není tepelně namáhán (jako při řezání plamenem) a přesnost řezu je v toleranci 0,1 [mm]. Při řezání laserovým svazkem není důležitá tvrdost materiálu, ale jeho tepelné a optické vlastnosti a povrch materiálu. Důležité je dopravit na povrch materiálu záření o co největší hustotě, protože čím větší je hustota záření, tím rychleji dosáhneme natavení.

Pro řezání např. dřeva můžeme použít CO₂ laser o výkonu 200 [W] při rychlosti řezání 1 [m/s]. Materiál není třeba již dále opracovávat. Šířka řezu je 0,1 – 1 [mm], tedy podstatně menší než při mechanickém řezání, což je jedna z výhod řezání laserem. Technologie je nehlučná a bezodpadová, je třeba pouze odvádět kouřové zplodiny, které při řezání vznikají.

Stejným způsobem lze řezat také např. plasty, azbest, sklo, papír a další materiály s malou tepelnou vodivostí.

/1/

3.6. SVAŘOVÁNÍ

Při svařování se používá svazek laserového záření k roztavení materiálu do požadované hloubky s minimálním odpařením povrchu.

Pro svařování se používají Nd:YAG a CO₂ lasery. Svařování vyžaduje oproti jiným aplikacím menší intenzitu záření, ale větší délku laserového impulsu.

U svařování, vrtání a řezání dochází k natavení povrchové vrstvy, kdy je potřeba záření s následující hustotou výkonu /8/ :

$$q_c = \frac{0,885 \cdot T_t \cdot \lambda_t}{\sqrt{\lambda_t \cdot \tau_c}} , \quad (35)$$

kde q_c je kritická hustota výkonu, λ_t je součinitel tepelné vodivosti, T_t je teplota tání materiálu, τ_c je doba trvání impulsu.

U kontinuálních laserů můžeme rychlost, při které dojde k natavení materiálu, stanovit ze vztahu /9/ :

$$\frac{v_v}{v_t} = \frac{(T_t - T_o)^2}{(T_v - T_o)^2} , \quad (36)$$

kde v_v , v_t je rychlost, při které dochází k varu, resp. tavení a $T_{t, v, o}$ je teplota tání, resp. varu kovu nebo počáteční teplota.

Výhody svařování laserem :

- nedochází ke kontaktu s elektrodou
- lokalizovaný ohřev a rychlé ochlazení
- schopnost svářet různorodé materiály
- schopnost svářet součástky v dané atmosféře

4. NÁVRH ZÁKLADNÍHO USPOŘÁDÁNÍ

Principiálně lze pro všechny již výše uvedené technologie použít jeden typ schématu zařízení, s tím, že můžeme v podstatě navrhnout konstrukce zařízení, které se budou lišit způsobem přenosu záření ze zdroje do místa určení, a způsobem umožňující pohyb a tvorbu modelu.

4.1. PŘENOS POMOCÍ OPTIKY

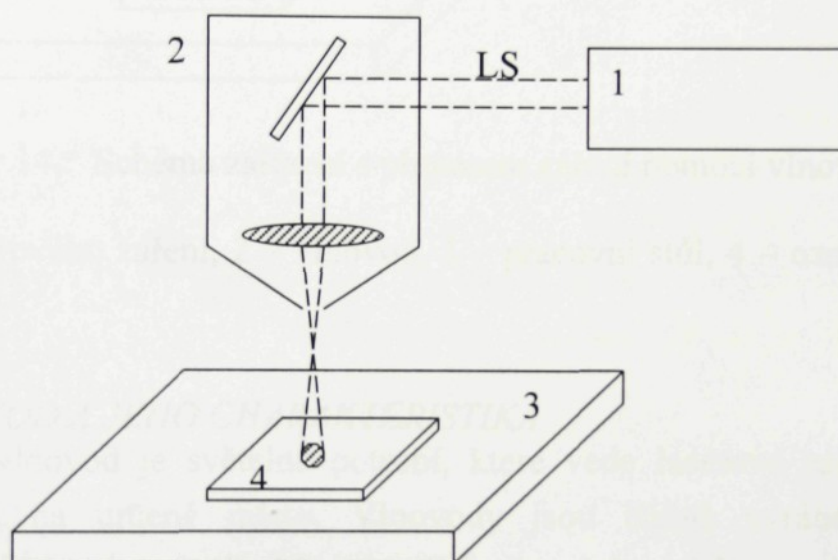
Pro přenos laserového záření můžeme použít dva různé způsoby. Prvním z nich je přenos pomocí optiky (viz obr.13.), který je uskutečněn pomocí zrcadel a čoček, jejichž příklady jsou uvedeny v příloze č.2..

Nevýhody přenosu laserového svazku pomocí optiky jsou :

- větší nároky na prostor oproti přenosu vlnovodem
- složitější konstrukce
- nutnost zajištění bezpečnosti pracovníků před zasažením laserovým paprskem, s tím související složitá konstrukce krytů

Výhody přenosu laserového svazku pomocí optiky:

- zanedbatelné ztráty, přibližně 1% na jednom zrcadle
- menší náklady na prvky optické hlavy ve srovnání s použitím vlnovodu



Obr.13.: Schéma zařízení s přenosem záření pomocí optiky.

1 – zdroj laserového záření, 2 – optická hlava, 3 – pracovní stůl,
4 – ozařovaný objekt, LS – laserový svazek.

4.2. PŘENOS POMOCÍ VLNOVODU

Druhým způsobem přenosu svazku laserového záření je přenos pomocí vlnovodu (viz obr.14.), což je vedení tvořené pomocí optických vláken. Vlnovod je blíže popsán v kapitole (4.2.1.).

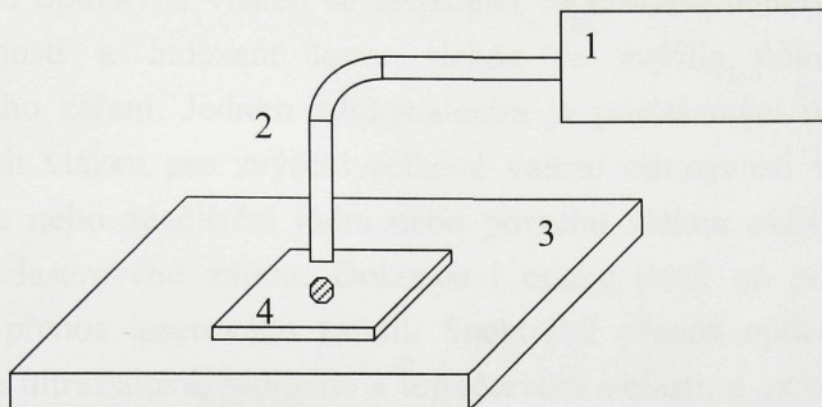
Nevýhody přenosu pomocí vlnovodu :

- značné nároky na kvalitu a čistotu povrchu optických vláken
- nutnost přesného zabroušení konců vláken při jejich spojování pro přenos na větší vzdálenosti
- dodržení určitého minimálního poloměru ohybu vlnovodu

- složitá a nákladná výroba optických vláken

Výhody přenosu pomocí vlnovodu:

- snadné přivedení svazku laserového záření do pracovního prostoru
- pouze drobné úpravy stroje pro uchycení vlnovodu



Obr.14.: Schéma zařízení s přenosem záření pomocí vlnovodu.

1 – zdroj laserového záření, 2 – vlnovod, 3 – pracovní stůl, 4 – ozařovaný objekt.

4.2.1. VLNOVOD A JEHO CHARAKTERISTIKA

Laserový vlnovod je světelné potrubí, které vede laserové záření ze zdroje záření na určené místo. Vlnovody jsou běžně vyráběny ze skleněných vláken, plastu nebo křemene. Průměry těchto vláken mohou být v rozmezí od 2 $[\mu\text{m}]$ do 250 $[\mu\text{m}]$, podle typu použitého materiálu. Obvykle jsou vlákna shromážděna do svazku a uzavřena do pouzdra z polyvinyl – chloridu. Potom jsou konce jednotlivých vláken spojeny dohromady epoxidovým materiálem a vyleštěny. Tento světlovod je znám také jako svazek optických vláken.

Ztráty při přenosu záření jsou způsobeny několika faktory /11/ :

- úhel, pod kterým vstupuje světelný paprsek do vlákna
- délka vlákna
- absorpční vlastnosti vlákna
- ztráty způsobené odrazivostí koncových ploch
- index lomu skleněného vlákna

Existují dva základní druhy optických vláken pro koherentní a nekoherentní vedení. U koherentního typu jsou vlákna v celém svazku uspořádána tak, že jejich pozice jsou na obou koncích stejné.

U nekoherentního typu jsou vlákna uspořádána nepravidelně, ale mají přibližně účinnost světelného přenosu jako koherentní typ.

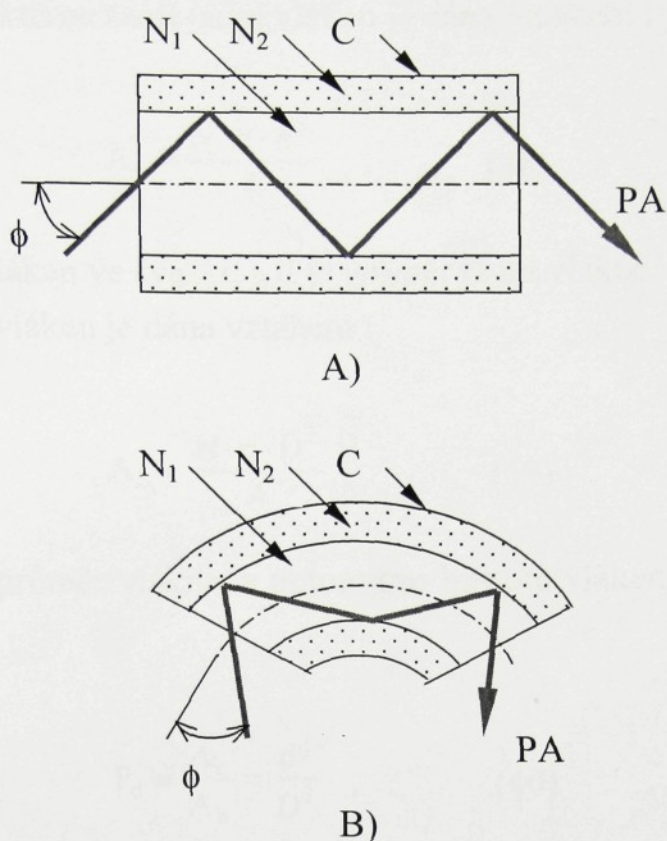
Vedení laserového záření pomocí optických vláken nachází široké uplatnění v průmyslu, medicíně a ve vojenských aplikacích. Objevem materiálů optických vláken se zlepšující se čistotou materiálu, hustotou, průhledností a indexem lomu vlákna se zvýšila účinnost přenosu laserového záření. Jedním zdokonalením je povlakování nebo plátování optických vláken pro zvýšení celkové vnitřní odrazivosti vláken. Každá nečistota nebo znečištění jádra nebo povrchu vlákna ovlivňuje účinnost přenosu laserového záření. Dokonce i otisky prstů na povrchu vlákna ovlivní přenos laserového záření. Spektrální přenos optickým vláknem zahrnuje ultrafialové, viditelné a infračervené oblasti, a existují specifická vlákna pro přenos jednotlivých vlnových délek požadovaného záření. Např. vlákno z křemene může přenášet ultrafialové záření stejně jako viditelné. Vláknem z germania může přenášet světlo vlnových délek z oblasti infračerveného záření. Pevný úhel světelného kužele dopadajícího na povrch vlákna záleží na indexu odrazivosti a na povlakovém materiálu.

4.2.2. CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN

$$NA = N_a \cdot \sin \phi = \sqrt{(N_1^2 - N_2^2)}, \quad (37)$$

kde NA je numerická apertura, N_a je index odrazivosti vnějšího materiálu, N_1 je index odrazivosti jádra vlákna, N_2 je index odrazivosti povlaku vlákna a ϕ je úhel mezi normálou povrchu konce vlákna a směrem světelného paprsku.

Účinnost přenosu bude největší pro povlakovaná vlákna (povrch C), a index odrazivosti jádra N_1 musí být větší než index odrazivosti N_2 . Paprsek prochází přes optické vlákno s totální odrazivostí. To nastane, když laserový paprsek, např. obr.15., dopadá na povrch optického vlákna, které má index odrazivosti N_1 větší než index odrazivosti N_2 , v rozsahu kritického úhlu.



Obr.15.: Přenos laserového paprsku R :
A) přímým vedením
B) zahnutým vedením

Paprsek se mnohonásobně odráží mezi styčnými plochami plátování a jádra, dokud neprojde vláknem až na druhý konec, odkud paprsek vystupuje pod stejným úhlem ϕ . Jestliže bude paprsek vstupovat do optického vlákna pod úhlem větším, než je úhel ϕ , bude paprsek ztrácet odrazivost, právě tak, jako když nebude zaručena totální odrazivost povrchu. Vztah (37) platí pro přímý přenos, u křivočarého přenosu se bude měnit. Pro velmi tenká vlákna, v rozsahu 40 $[\mu\text{m}]$, ztrácí tento vztah význam. Index odrazivosti jádra skleněného vlákna bývá 1,65 a index odrazivosti povlaku je 1,53. Tyto parametry se mění s různými typy a kvalitami vláken a materiálů povlaků. U vláken z plastu jsou indexy odrazivosti jádra a povlaku nižší než u skleněných vláken. Průměr svazku vláken se pohybuje v rozmezí od 1 $[\text{mm}]$ do 12,7 $[\text{mm}]$.

Vlnovod je tvořen množstvím vláken kruhového průřezu seskupených do svazku (viz obr.16.B)), jejichž hustota ve svazku je dána vztahem (40). Tento vztah je dán poměrem ploch, které vycházejí z obr.16.A).

Celková plocha, kterou tvoří jádra vláken je dána vztahem :

$$A_c = \frac{N \cdot \pi \cdot d^2}{4} , \quad (38)$$

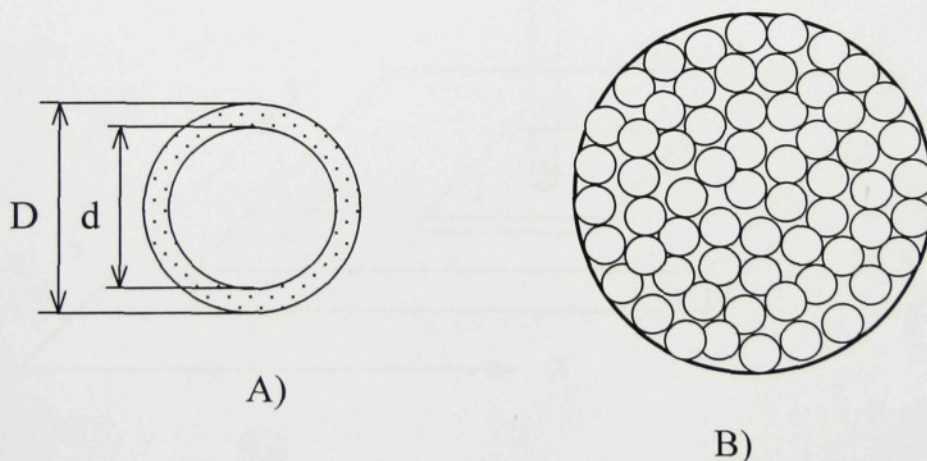
kde N je počet vláken ve svazku a d je průměr jádra vlákna.

Celková plocha vláken je dána vztahem :

$$A_b = \frac{N \cdot \pi \cdot D^2}{4} , \quad (39)$$

kde D je vnější průměr vlákna, a potom pro hustotu vláken ve svazku platí vztah :

$$P_d = \frac{A_c}{A_b} = \frac{d^2}{D^2} . \quad (40)$$



Obr.16.: A) Samostatné vlákno
B) Svazek vláken

Optická vlákna se používají hlavně pro přenos záření o vlnové délce v oblasti viditelného a infračerveného světla.

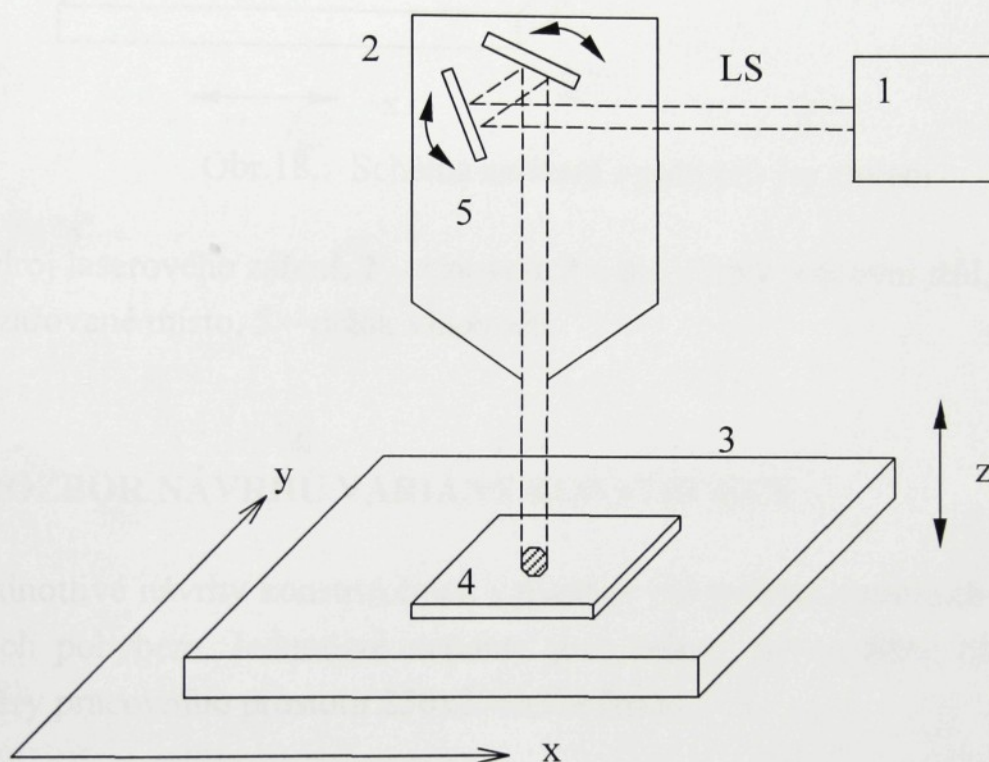
Z tohoto důvodu pro přenos záření při vytvrzování fotopolymerů použijeme přenos pomocí optiky, protože lasery používané pro vytvrzování fotopolymerů generují záření o vlnové délce přibližně 300 [nm], a náklady na výrobu vláken pro přenos tohoto záření pomocí optických vláken by byly značně vysoké.

4.3. KONSTRUKČNÍ MOŽNOSTI USPOŘÁDÁNÍ

Dále budeme uvažovat dvě různé konstrukční varianty umožňující pohyb a následnou tvorbu modelu.

4.3.1. OTOČNÁ OPTIKA

V prvním případě je pohyb umožněn pomocí optiky, a možné konstrukční varianty jsou zpracovány v kapitole 5. Varianta, znázorněná na obr.17., kde je rozmítán paprsek v ose X,Y pomocí dvou otočných zrcátek, je jednou z možností konstrukce.

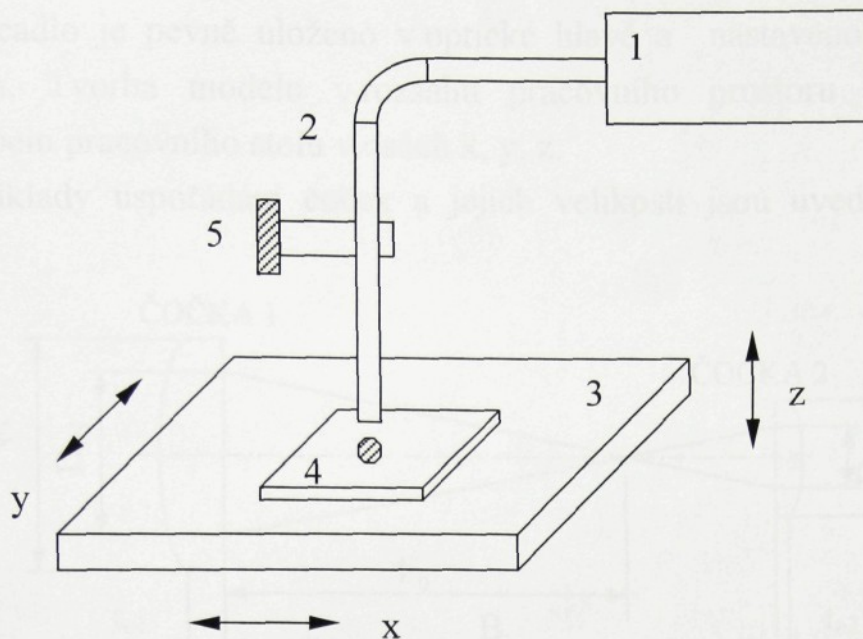


Obr.17.: Schéma zařízení se scannery.

1 – zdroj laserového záření, 2 – optická hlava, 3 – pracovní stůl,
4 – ozařované místo, 5 – zrcátka, LS – svazek laserového záření.

4.3.2. POHYBLIVÝ STŮL

U této varianty je svazek laserového záření pevný, a může být přiváděn dvěma způsoby, které jsou uvedeny v kapitole (4.1. a 4.2.). Tvorba modelu bude umožněna pohybem pracovního stolu v osách x, y, z. Tato varianta je znázorněna na obrázku 18.



Obr.18.: Schéma zařízení s pohyblivým stolem.

1 – zdroj laserového záření, 2 – vlnovod, 3 – pohyblivý pracovní stůl,
4 – ozařované místo, 5 – držák vlnovodu.

5. ROZBOR NÁVRHŮ VARIANT KONSTRUKCE

Jednotlivé návrhy konstrukčních variant se liší počtem optických prvků a jejich pohybem. Jednotlivé varianty jsou řešeny pro zvolené základní rozměry pracovního prostoru 250x250x250 [mm].

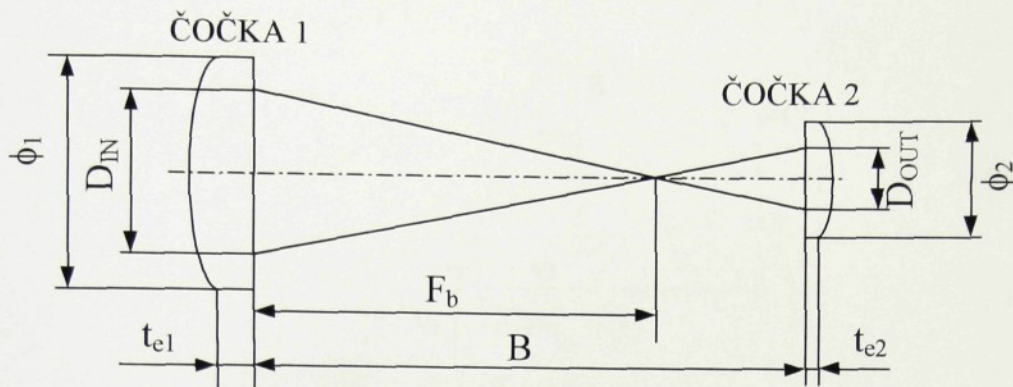
5.1. KONSTRUKCE OPTICKÉ HLAVY S PEVNÝM ZRCÁTKEM

V tomto případě bude svazek laserového záření přiveden ze zdroje záření – laseru do pracovního prostoru pomocí pevného zrcadla, jak je znázorněno na (obr.19.).

V tubusu je umístěna soustava dvou čoček, na obrázku znázorněná pouze schematicky jako jedna posuvná čočka, která soustřeďuje průměr svazku paprsku vystupujícího s laseru na desetinu. Změnou vzdálenosti mezi čočkami a volbou čoček o jiných rozměrech, lze měnit zmenšení průměru paprsku vystupujícího z optické soustavy.

Zrcadlo je pevně uloženo v optické hlavě a nastaveno pod pevným úhlem. Tvorba modelu v rozsahu pracovního prostoru je umožněna pohybem pracovního stolu v osách x, y, z.

Příklady uspořádání čoček a jejich velikostí jsou uvedeny v tabulce č.11..



Tab.11. Tabulka příkladů čoček a jejich uspořádání.

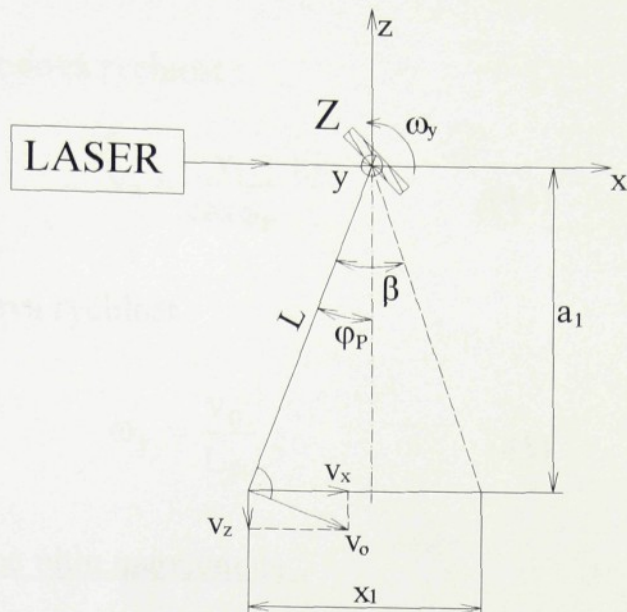
Zmenšení	Čočka 1			Čočka 2		B [mm]	Název sestavy
	ϕ_1 [mm]	f_b [mm]	t_{e1} [mm]	ϕ_2 [mm]	t_{e2} [mm]		
5x	17,0	9,5	2,2	5,1	1,1	59,3	01LBX001
10x	32,0	9,5	3,8	5,1	1,1	109,7	01LBX003
20x	62,2	9,5	2,7	5,1	1,1	214,5	01LBX005
50x	111,8	-6,6	*	7,1	2,9	274,0	01LBX007

5.2. KONSTRUKCE OPTICKÉ HLAVY S JEDNÍM OTOČNÝM ZRCÁTKEM

Paprsek je veden stejně jako u předchozí metody pomocí tubusu se soustavou čoček k otočnému zrcátku, které umožňuje otáčením kolem osy y rozmítání paprsku ve směru osy x. Tímto vlastně odpadá nutnost pohybu pracovního stolu ve všech třech osách, a stačí pouze pohyb v osách y a z.

Konstrukční řešení této varianty, zobrazené na obr.20., bude v podstatě stejné, s výjimkou uložení zrcátka v optické hlavě, které musí být uloženo otočně. Optická hlava je rozšířena o pohon, který otáčí zrcátkem. Pohonem může být buďto rotační servopohon s odečítáním úhlové pozice, polohový transformátor nebo krokový motorek, který splňuje naše požadavky na natáčení zrcátka.

Teoretický výpočet základních parametrů :



v_x ... rychlost pohybu laserového paprsku

a_1 ... vzdálenost povrchu součásti od zrcátka

β ... maximální úhel natočení zrcátka

x_1 ... délka pracovního prostoru v ose x

L_P ... délka laserového paprsku

ω_y ... úhlová rychlost otáčení kolem osy y

Délka laserového paprsku L_P :

$$L = \frac{a_1}{\cos \varphi_P} \quad (41)$$

Úhel natočení zrcátka β :

$$\varphi_P = \arctan \frac{x_1}{2 \cdot a_1} \quad (42)$$

$$\beta = 2 \cdot \varphi_P \quad (43)$$

Rychlost otáčení zrcátka ω_y :

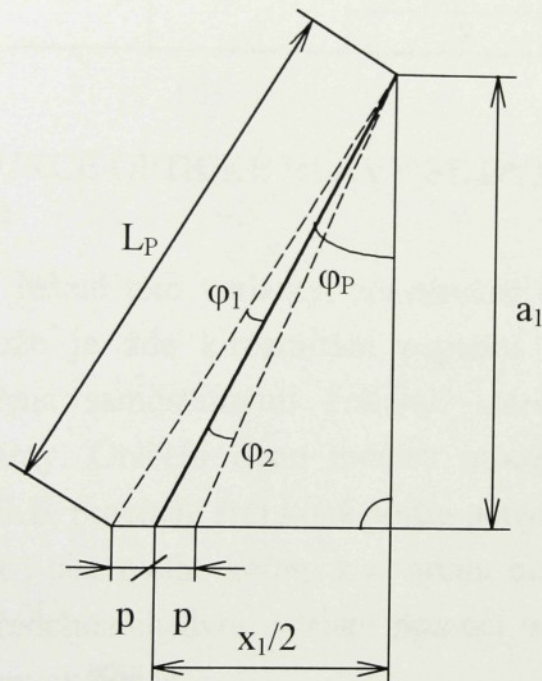
- obvodová rychlost :

$$v_0 = \frac{v_x}{\cos \varphi_P} \quad (44)$$

- úhlová rychlost :

$$\omega_y = \frac{v_0}{L_P} \quad (45)$$

Výpočet tolerance úhlu natočení φ_1 :



$\pm p$... tolerance dopadu laserového paprsku, jelikož je úhel $\varphi_1 < \varphi_2$, provedu výpočet pouze pro úhel φ_1 .

$$\operatorname{tg}(\varphi + \varphi_1) = \frac{x_1/2 + p}{a_1} \quad (46)$$

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{x_1/2 + p}{a_1}\right) - \varphi_P \quad (47)$$

Tab.11. Tabulka hodnot pro volbu pohonu zrcátka v závislosti na vzdálenosti a_1 zrcátka od povrchu součásti.

Vzdálenost zrcátka od součásti a_1 [mm]	Délka pracovního rozsahu x_1 [mm]	Tolerance dopadu paprsku p [mm]	Tolerance úhlu natočení φ_1 [°]	Rychlost pohybu paprsku v_x [m/s]	Úhlová rychlost otáčení ω_y [s ⁻¹]
200	250	0,05	3,94	5	25,0
250			3,55		20,0
300			3,18		16,7
350			2,85		14,3
400			2,57		12,5
450			2,34		11,1
500			2,17		10,0
550			1,97		9,1
600			1,82		8,3
650			1,69		7,7
700			1,58		7,1

5.3. KONSTRUKCE OPTICKÉ HLAVY SE DVĚMA OTOČNÝMI ZRCÁTKY

Konstrukční řešení této varianty, znázorněné na obr.21., bude o něco složitější, protože je zde k rozmítání paprsku potřeba dvou otočných zrcátek se dvěma samostatnými pohony, které budou stejné jako u předchozí varianty. Otáčení obou zrcátek umožňuje rozmítání paprsku v osách x a y , takže pracovní stůl koná pouze pohyb v ose z .

Přívod svazku laserového záření k prvnímu otočnému zrcátku je řešen stejně jako u předchozích dvou variant pomocí tubusu se soustavou dvou vzájemně posuvných čoček.

5.4. KONSTRUKCE OTOČNÉ OPTICKÉ HLAVY

Návrh tohoto zařízení je ze čtyř uvažovaných konstrukčních řešení nejsložitější, protože je zde rozmítání paprsku umožněno otáčením jednotlivých částí hlavy a navíc ještě přímočarým pohybem hlavy v osách x, y .

Zařízení s takto konstruovanou laserovou hlavou představuje na světovém trhu firma PRIMA INDUSTRIE pod názvem RAPIDO 5.

Zařízení pracuje s výkonem v rozsahu $1500 \div 3000$ [W] v pracovním prostoru o rozměrech $3200 \times 1525 \times 600$ [mm].

Pohony, umožňující rotační pohyb kolem dvou os, jsou umístěny uvnitř jednotlivých částí hlavy. Převod mezi servopohonem a otáčenou částí je uskutečněn pomocí převodovky. Ve schématu otočné hlavy je tento pohon znázorněn pouze schematicky.

Princip laserové hlavy tohoto zařízení je schematicky znázorněn na obr.22. a laserový systém RAPIDO 5 je uveden v příloze č.4..

5.5. MOŽNOSTI VYUŽITÍ

Tato zařízení je možné využít buďto jako část samostatného zařízení nebo jako přídavné zařízení pro obráběcí stroje. Při aplikaci laserů s různými výkony lze tato zařízení využít k následujícím technologickým operacím :

- řezání
- svařování
- tepelné vytvrzování

Blíže jsou možnosti využití tohoto zařízení popsány v kapitole (2.12.).

6. NÁVRH POHONU

Pro pohon zrcátek je možné použít buďto krokový motorek nebo rotační servopohon. Obě možnosti přinášejí určité výhody i nevýhody.

Velkou nevýhodou krokového motorku oproti servopohonu je to, že není možné zjistit a kontrolovat současnou polohu, ve které se krokový motorek nachází. Nelze zjistit chybu natočení motorku.

Velkým kladem je však cena krokového motorku, která se pohybuje řádově kolem 1000 Kč. Oproti servopohonu je cena zanedbatelná, protože cena servopohonu je přibližně 30 000 Kč. Z tohoto důvodu jsem zvolil pro pohon krokový motorek s různým počtem kroků.

1. Krokový motorek s plným krokem :

Pro vzdálenosti a_1 v rozsahu 200 až 600 [mm], jak je uvedeno v tabulce č.11., stačí použít krokový motorek s velikostí kroku $1,8 [^\circ]$, který má 200 kroků na otáčku. Konstanta $K = 1$ tj. jde o jednotaktní motor. Jeho charakteristické parametry jsou uvedeny v příloze č.3..

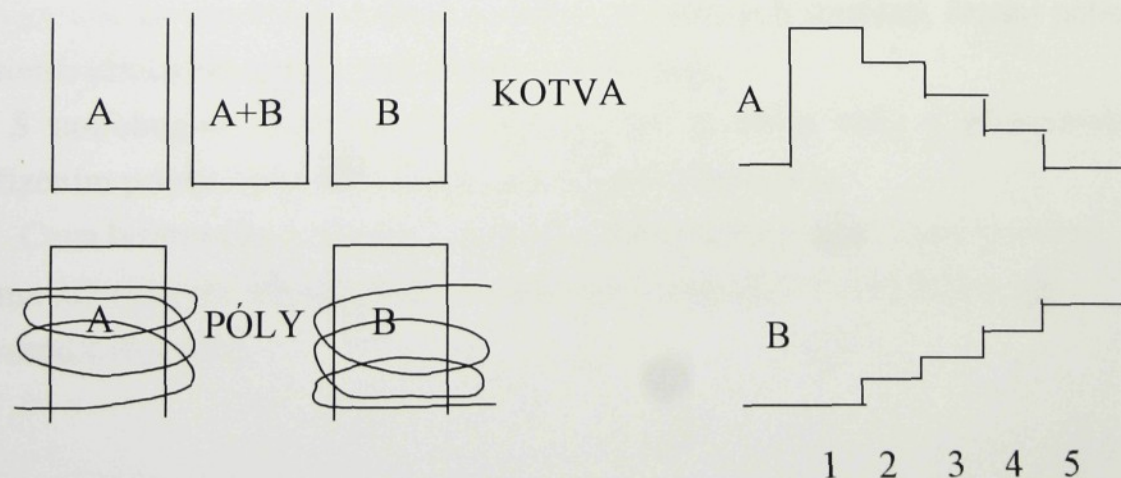
2. Krokový motorek s polovičním krokem :

Pro případ větší vzdálenosti než 600 [mm] by bylo nutné použít krokový motorek s polovičním krokem, to znamená 400 kroků na otáčku, kde konstanta $K = 2$ a jde o dvoutaktní motor.

3. Krokový motorek s interpolovaným krokem :

Počet kroků tohoto motorku je dán následujícím součinem $200 \cdot K$, kde $K = 4, 6, 8, 10, 20, \dots$, takže se krokový motorek pohybuje téměř plynule a lze ho nastavit do libovolné polohy. Je toho docíleno tím způsobem, že proud mezi póly A a B je postupně přiváděn v různých poměrech např.

$I_A = 0, I_A = 0,1 \cdot I_B, I_A = 0,2 \cdot I_B, I_A = 0,3 \cdot I_B \dots \dots$



7. VOLBA VÝSLEDNÉ KONSTRUKČNÍ VARIANTY

Ze čtyř navrhovaných konstrukcí jsem vybral třetí konstrukční variantu se dvěma otočnými zrcátky, protože takto zkonstruované zařízení umožňuje při použití různých optických prvků a zdroje laserového záření komplexní využití. Pomocí optických filtrů lze také regulovat výstupní výkon laseru, čímž se možnost použití rozšíří. Tato varianta není konstrukčně složitá a také není tak finančně náročná jako zařízení zmíněné v kapitole 5.4.. Jsou zde také kladeny menší nároky na pohyb pracovního stolu, u kterého stačí pouze pohyb v ose z. Pro volbu optických prvků je nejdůležitější vlnová délka a účinnost laserového záření.

Vyjmutelné pouzdro je možné regulací vzdálenosti čoček využít pro nastavení průměru svazku paprsků.

8. ZHODNOCENÍ

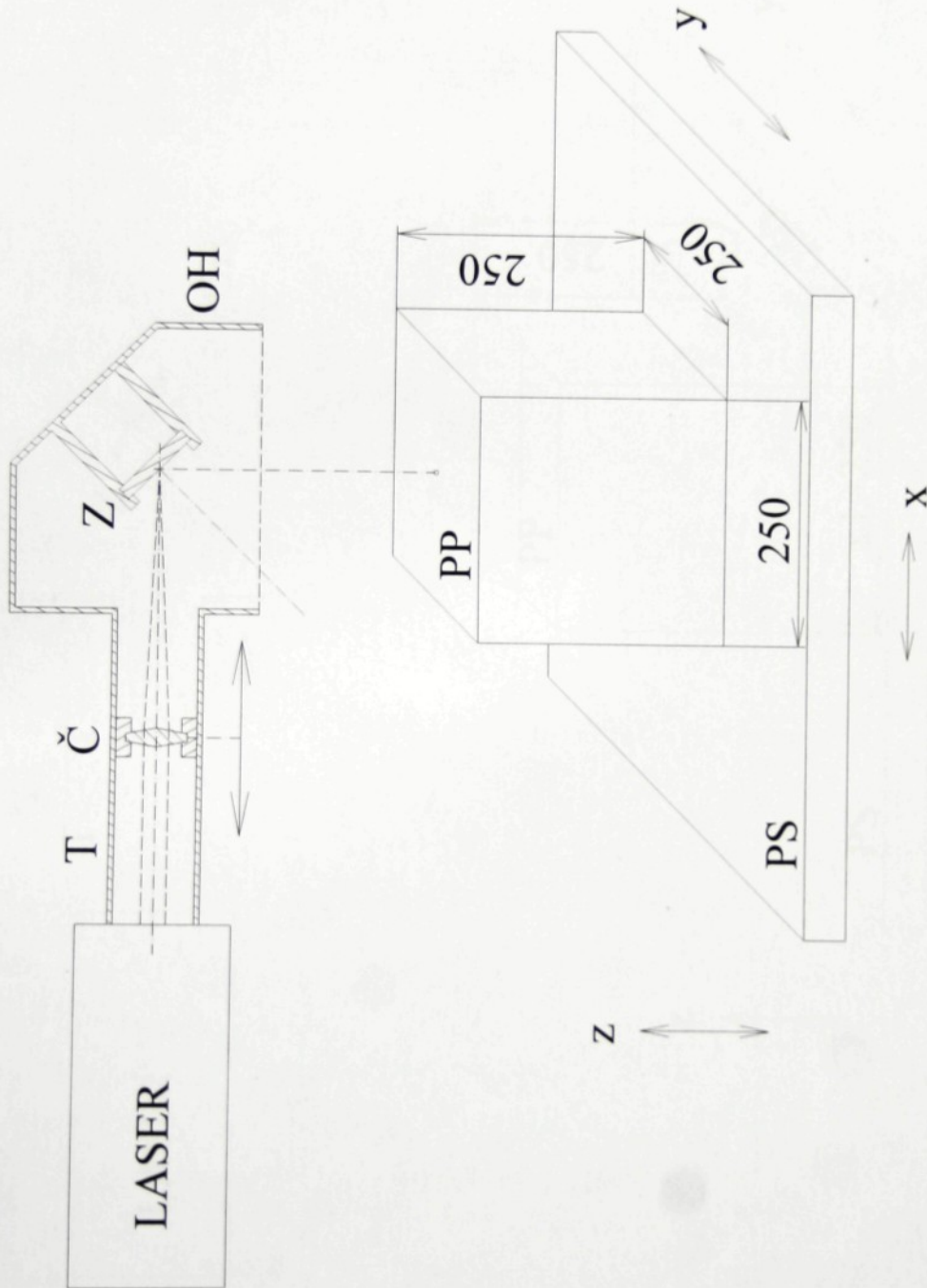
Navrhovaná konstrukce zařízení má široký rozsah využití. Při doplnění pracovním stolem, který umožní pohyb v ose z, lze zařízení využít samostatně.

Dále je možné ho použít jako část výrobní linky nebo obráběcího centra. Navrhovaná laserová hlava také může tvořit koncový člen robota.

Laserová hlava může být použita jako přídavné zařízení obráběcích strojů, kde by umožnila dodatečné kalení obráběných součástí, řezání nebo u soustružnického centra také vlastní soustružení.

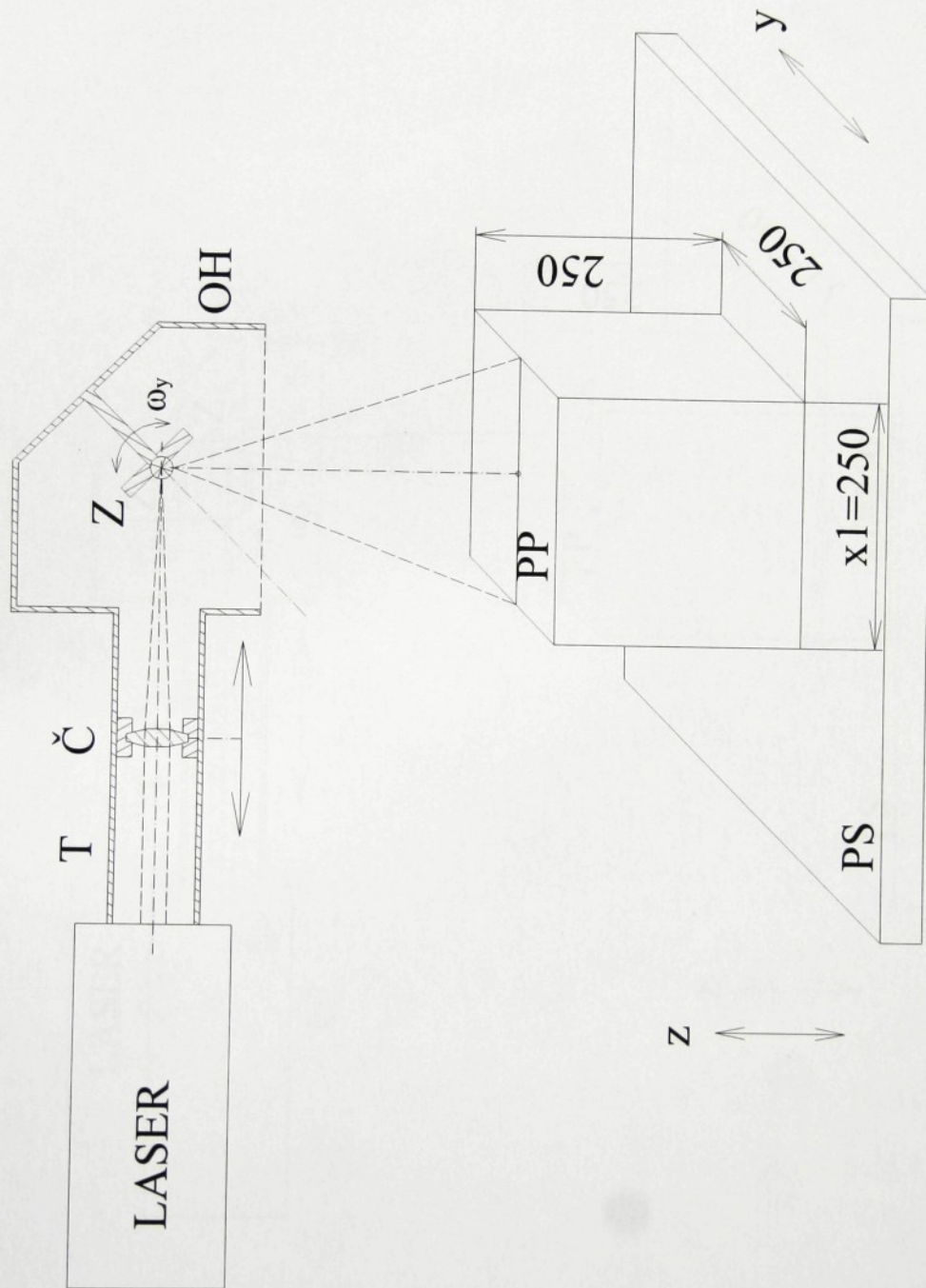
S potřebnými úpravami by bylo možné obráběcí stroj s přídavným zařízením použít i pro některé metody Rapid Prototyping.

Cena laserového zařízení je značně vysoká, pouze laser, který používá firma 3D systems v laserovém systému stojí přibližně 70 000 DM a má životnost dva roky.



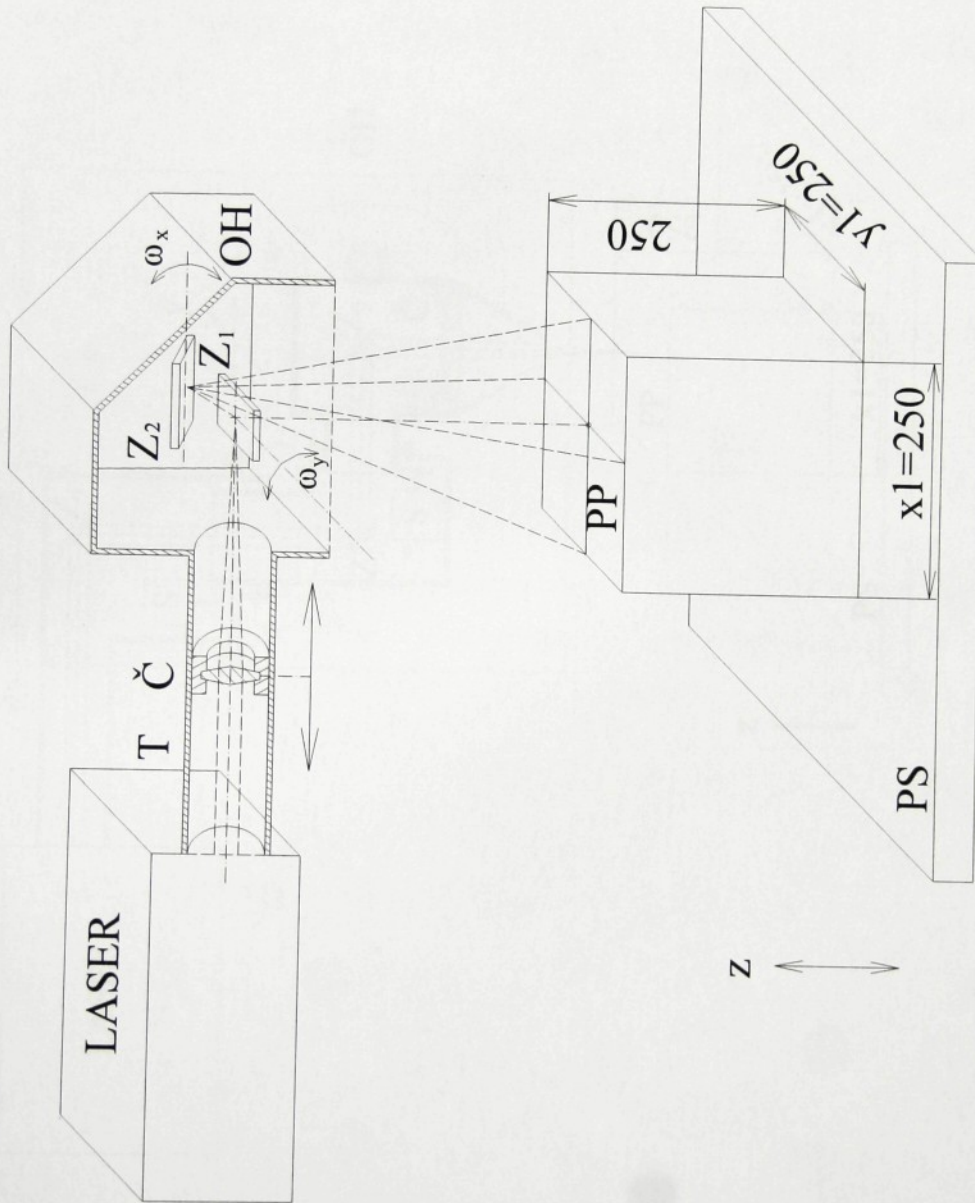
Obr.19.: Konstrukce zařízení s pevným zrcátkem.

T - tubus, Č - soustava čoček, Z - zrcátko, OH - optická hlava, PP - pracovní prostor, PS - pracovní stůl.



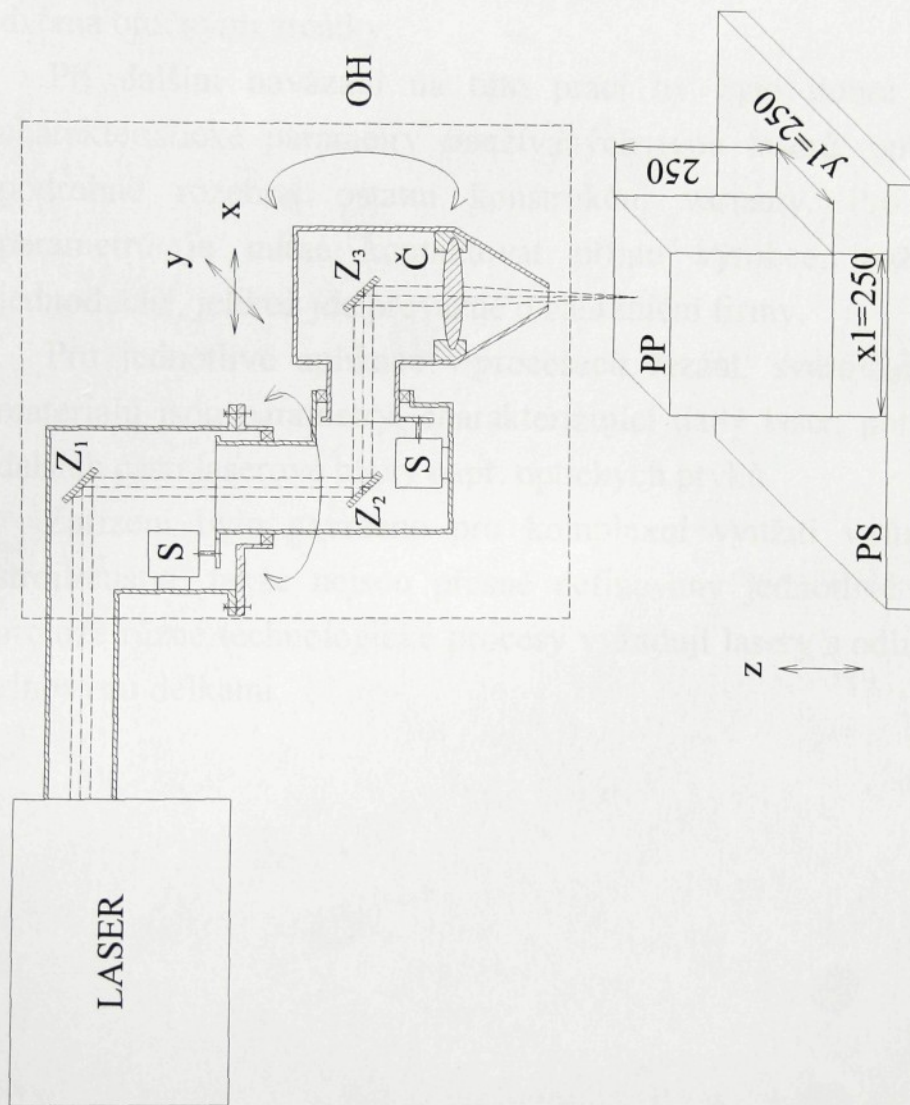
Obr.20.: Konstrukce zařízení s jedním otočným zrcátkem.

T - tubus, Č - soustava čoček, Z - zrcátko, OH - optická hlava, PP - pracovní prostor, PS - pracovní stůl.



Obr.21.: Konstrukce zařízení se dvěma otočnými zrcátky.

T - tubus, Č - soustava čoček, Z_1 , Z_2 - zrcátka 1 a 2, OH - optická hlava, PP - pracovní prostor, PS - pracovní stůl.



Obr.22.: Konstrukce zařízení s otočnou a posuvnou optickou hlavou.

Z_1, Z_2 – zrcátka, $\check{C}$ – soustava čoček, OH – optická hlava, PP – pracovní prostor, PS – pracovní stůl, S – servopohon s převodovkou.

9. ZÁVĚR

V rámci vymezeného času a možností byl v této práci proveden teoretický rozbor daného problému, popis jednotlivých typů laserů, výpočet základních vztahů procesu ohřevu laserovým zářením a návrh konstrukce laserové hlavy, která byla zvolena v závislosti na její aplikaci.

Výsledná konstrukce by měla být výhodná i z hlediska ekonomického, proto jsem z důvodu komplexního využití zvolil konstrukční variantu se dvěma otočnými zrcátky.

Při dalším navázání na tuto práci by bylo dobré konkrétně určit charakteristické parametry používaných typů laserů, optických prvků a podrobně rozebrat ostatní konstrukční varianty. Pro zjištění těchto parametrů je nutné kontaktovat přímo výrobce, což není mnohdy jednoduché, jelikož jde převážně o zahraniční firmy.

Pro jednotlivé aplikace v procesech řezání, svařování a vytvrzování materiálů jsou parametry, charakterizující daný laser, potřebné pro návrh dalších částí laserové hlavy např. optických prvků.

Zařízení bylo navrženo pro komplexní využití v různých oblastech strojírenství, takže nejsou přesně definovány jednotlivé prvky zařízení, protože různé technologické procesy vyžadují lasery s odlišnými výkony a vlnovými délkami.

POUŽITÁ LITERATURA :

- /1/ Engst, P. – Horák, M.: Aplikace laserů, Populární přednášky o fyzice – svazek 34, Praha, 1989.
- /2/ Vrbová, M. – Jelínková, H. – Gavrilov, P.: Úvod do laserové techniky, Praha, 1994.
- /3/ Kovalenko, V. S.: Uproščennije dėtalej lučom lasera, Kiev, Technika, 1981.
- /4/ Rykalin, N. N. a kol.: Vysokotemperaturnyje tehnologičeskije processy, 1. vydání, Moskva, 1986.
- /5/ Duley, W. W.: Lasernaja tehnologija i analiz materialov, 1. vydání, Moskva, 1986.
- /6/ Internet : www.3dsystems.com
- /7/ Fuka, J. : Optika a atomová fyzika, 1. Vydání, Praha, 1961.
- /8/ Braun, M. : Absorpce laserového záření při laserovém tepelném zpracování, [Diplomová práce], Liberec 1991 – Technická univerzita, fakulta strojní.
- /9/ Miloslav Holý : Tepelné zpracování ocelí paprskem laseru, [Diplomová práce], Liberec 1981 – VŠST, fakulta strojní.
- /10/ Bláha, J. : Metodika přípravy a zkoumání vzorků při studiu interakce laserového záření s ocelí, [Diplomová práce], Liberec 1987 – VŠST, fakulta strojní.
- /11/ Muncheryan, H. M. : Laser technology, Indianapolis, Indiana 1979.
- /12/ Firma PRIMA INDUSTRIE S.p.A., 10097 Collegno – Via Antonelli, 32 – Italia.
- /13/ Firma PRC Corporation, North Frontage Road, Landing, NJ 07850 – USA, www.prclaser.com.

SEZNAM PŘÍLOH A PŘÍLOHY :

Příloha č.1. : Krystal pevno-látkového laseru.

Příloha č.2. : Příklady optických prvků.

Příloha č.3. : Charakteristické parametry krokového motoru.

Příloha č.4. : Laserový systém RAPIDO 5 firmy PRIMA INDUSTRIE.

Krystal neodymového laseru a jeho charakteristické hodnoty :



Chemical formula	$\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$
Space group	monoclinic; 2/m
Lattice constants [Å]	$a=8.098$; $b=10.417$; $c=7.583$; $\beta=94.43$ deg.
Density	7.27 g/cm^3
Mohs hardness	5
Melting point	$1075 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$
Thermal conductivity	$2.8[100]$; $2.2[010]$; $3.5[001] \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Thermal expansion	$4.0[100]$; $3.5[010]$; $8.5[001] 10\text{E-6} \text{ .K}^{-1}$
Transmission range	$350 \div 5500 \text{ nm}$
Refractive index [$1 \text{ }\mu\text{m}$, 25°]	$n^g=2.033$; $n^m=1.986$; $n^p=1.937$
Polymorphic transition	$1005 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Přístroje a komponenty

- optika pro výzkum (UV, laser)
- optika útrv, interferenční útrv
- akustická a optická modifikace
- akustické útrv a optické útrv
- krystaly, optické útrv, akustické útrv
- optické útrv

Polarizační útrv, interferenční útrv, optické útrv, optické útrv, optické útrv

Příloha č.2.

Čočky, sklička, tyčinky, okýnka,



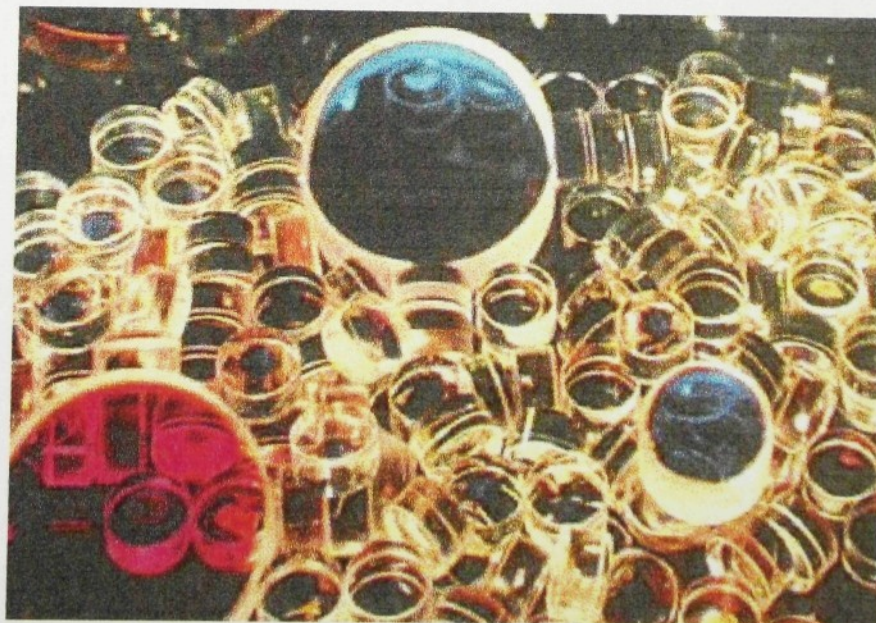
Příslušenství a komponenty laserů :

- optika pro výkonové CO₂ lasery
- optické filtry, interferenční filtry
- akustooptické a elektrooptické modulátory
- ochranné brýle s certifikátem
- krystaly, tyčinky, budiče, zrcadla, čočky
- objektivy F-theta

Polarizační filtry, interferenční filtry, spektrální filtry, selektivní zrcadla....



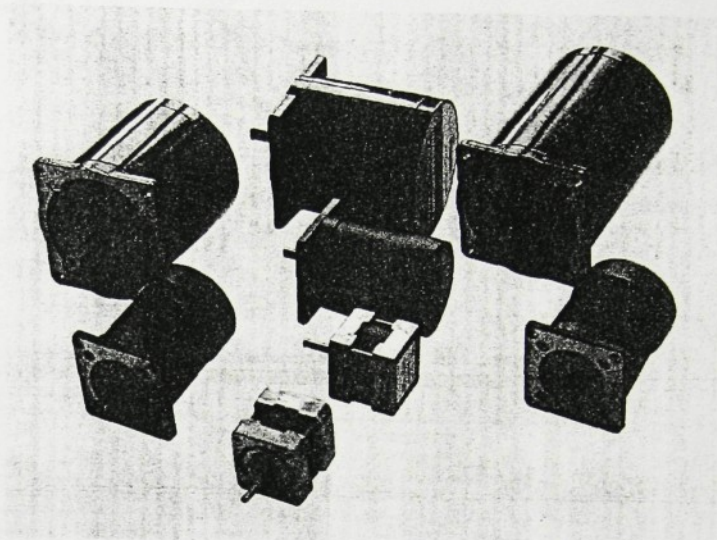
Čočky, sklíčka, tyčinky, okýnka,



Hybridní krokové motory řady SL se vyznačují vysokým momentem při malých rozměrech a vysokou účinností.

Motory řady SL mají všech 8 vývodů, je možné je zapojit jako čtyřfázové unipolární motory (s 5 vývody k napájecí) nebo jako dvoufázové bipolární motory (seriové nebo paralelní). Plné využití krokového motoru nabízí modernější bipolární napájení.

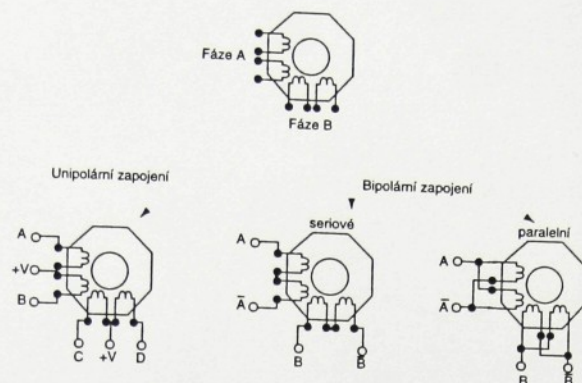
Kromě základních katalogových typů krokových motorů nabízíme i další typy a provedení dle specifikace zákazníka.



Technické parametry krokových motorů řady SL

	SL17-0301	SL 23-1012	SL 23-2812	SL 34-2530	SL 34-3550
Statický moment (Nm) [bipolární napájení, celokrok (Full step), jmenovitý proud v obou fázích]	0,15	1,2	1,2	3	5
Zbytkový moment (mNm)	6	50	50	100	120
Nejvyšší provozní moment při 400 Hz (Nm)	0,12 (50Hz)	0,9	0,9	2,6	4
Délka kroku (°)	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Tolerance kroku (°)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Moment setrvačnosti rotoru (kg m ² 10 ⁻⁴)	25 (g cm ²)	0,23	0,23	1,1	1,8
Hmotnost (kg)	0,22	0,85	0,85	2,6	3,7
Příruba-standard NEMA (mm)	40 x 40	56,4 x 56,4	56,4 x 56,4	83 x 83	83 x 83
Délka (mm)	39	76	76	95	128
φ hřídele (mm)	5	6,35	6,35	9,525	9,525
Izolační třída NEMA	B (130°C)	B (130°C)	B (130°C)	B (130°C)	B (130°C)
Proud (A) - seriové zapojení	0,3	1	2,8	2,5	3,5
paralelní zapojení	-	2	5,6	5	7
Indukčnost (mH) - seriové zapojení	45	27,2	3,2	16,8	8
paralelní zapojení	-	6,8	0,8	4,2	2
Odpor (Ω) - seriové zapojení	40	7,6	1,2	1,6	0,9
paralelní zapojení	-	1,9	0,3	0,4	0,23

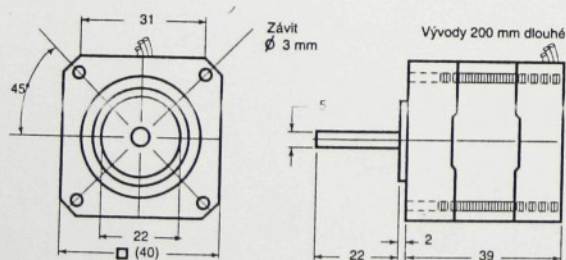
Zapojení vinutí - zakončení a sled fází



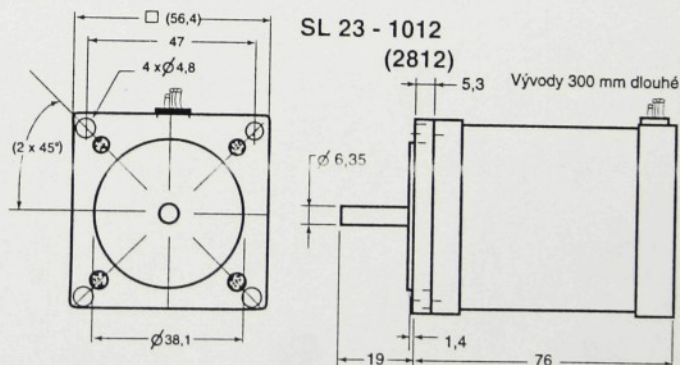
CW ↓	Unipolární celokrok				Bipolární celokrok				↑ CCW	0 = rozepruto + = kladný směr proudu - = záporný směr proudu GND = zem
	Step	A	B	C	D	A	$\bar{A}$	B	$\bar{B}$	
	1	GND	0	GND	0	+	-	-	+	
	2	0	GND	GND	0	-	+	-	+	
	3	0	GND	0	GND	-	+	+	-	
	4	GND	0	0	GND	+	-	+	-	
	1	GND	0	GND	0	+	-	-	+	

Rozměry v mm

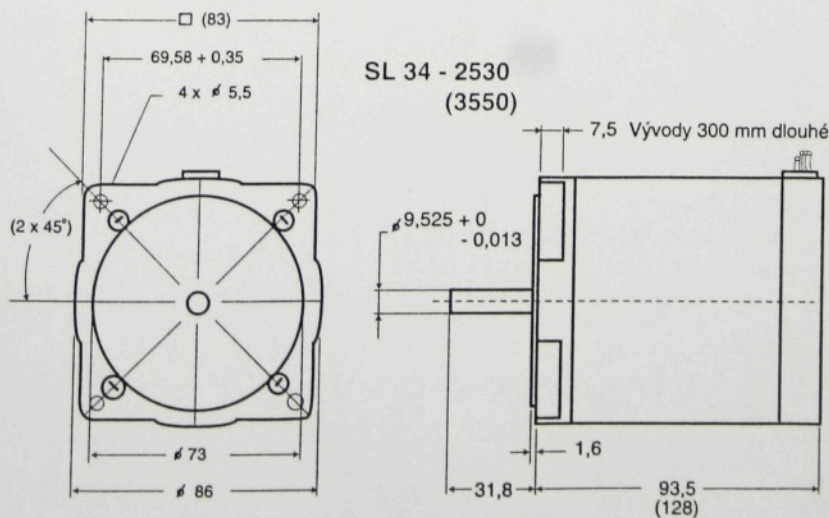
SL 17 - 0301



**SL 23 - 1012
(2812)**



**SL 34 - 2530
(3550)**



Příloha č.4.

Laserový systém RAPIDO 5 :

Rapido 5

THE LASER SOLUTION

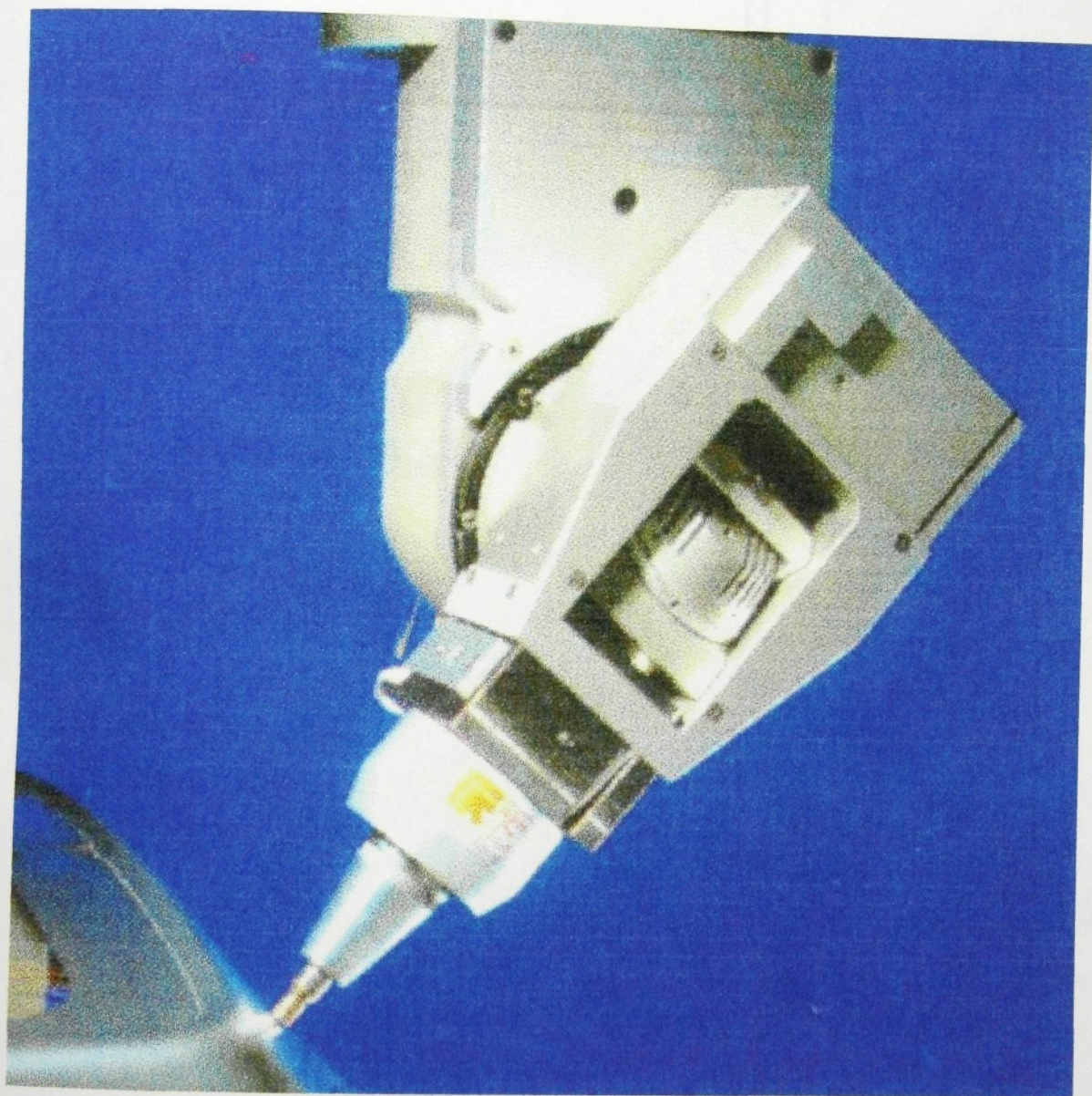


- Flying optics
- 5 axes + 6th adaptive axis with capacitive sensor
- Integrated unitized structure (the machine, the laser generator, the CNC, the electromechanics)
- Low shop floor space requirements
- 3-side full accessibility
- Easy and quick to install
- CNC PRIMACH-L, 32 bit, WINDOWS™
- Continuous 5-axis numerical control with space interpolation and Tool Center Point control
- Automatic setting of laser parameters
- Programming by self-teaching
- Programming by CAD/CAM with "FORMA" workstation
- Automatic safety cabin
- High pressure cutting kit
- Touch trigger probe

	RAPIDO	
	mm	inches
X	3200	126
Y	1525	60
Z	600	24
Rotation A	360° (continuous, without limitation)	
Rotation B	± 120°	

- PRIMA INDUSTRIE laser PL TURBO TF line, or other types, from 1500W to 3000W, integrated in the machine
- Ideal solution for prototypes, small series, spare parts
- Special applications in the car body manufacturing and the aerospace industry
- Standard automatic systems for loading/unloading
- Standard fume extraction and treatment systems

Detailní zobrazení laserové hlavy stroje RAPIDO 5 :



TU LIBEREC

POLITOVÁ

PROJEKT

VER.

1:1

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

279

280

281

282

283

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

316

317

318

319

320

321

POZ.	NÁZEV—ROZMĚR	VÝKRES—NORMA	MATERIÁL	J.	MN.	HMOTN. kg
1	TUBUS $\varnothing$ 100—200	ČSN 425510	11373	ks	1	
2	KRYT ODLITEK	————	——		1	
3	POUZDRO 1 TR $\varnothing$ 60x18—100	ČSN 425715	11353		1	
4	POUZDRO 2 TR $\varnothing$ 60x18—80	ČSN 425715	11353		1	
5	HLAVA SVAŘENEC	————	——		1	
6	PŘÍRUBA 1 $\varnothing$ 68—20	ČSN 425510	11373		2	
7	PŘÍRUBA 2 $\varnothing$ 68—30	ČSN 425510	11373		1	
8	PŘÍRUBA 3 $\varnothing$ 68—40	ČSN 425510	11373		1	
9	VÍKO 1 $\varnothing$ 50—30	ČSN 425510	11373		1	
10	VÍKO 2 $\varnothing$ 20—20	ČSN 425510	11373		1	
11	DRŽÁK 1 4HR15—50	ČSN 425520	11373		1	
12	DRŽÁK 2 4HR15—70	ČSN 425520	11373		1	
13	ŠROUB M2,5x6	ČSN 021130	——		12	
14	ŠROUB M3x10	ČSN 021130	——		8	
15	ŠROUB M1x3	ČSN 021130	——		2	
16	ŠROUB M1x6	ČSN 021130	——		12	
17	ŠROUB M1x8	ČSN 021130	——		8	
18	ŠROUB M5x9	ČSN 021130	——		6	
19	ŠROUB M1x5	ČSN 021130	——		12	
20	PODLOŽKA 5,3	ČSN 021703	——		6	
21	PODLOŽKA 2,7	ČSN 021703	——		12	
22	PODLOŽKA 3,2	ČSN 021703	——		8	
23	PODLOŽKA 1,1	ČSN 021703	——		34	
24	ZRCÁTKO 1	————	——		1	
25	ZRCÁTKO 2	————	——		1	
26	KROKOVÝ MOTOR SL 17—0301	————	——		1	
27	ČOČKA 1 $\varnothing$ 32	————	——		1	
28	ČOČKA 2 $\varnothing$ 5,1	————	——	v	1	

INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	TU LIBEREC	
VYPR. PFTR JAHN		NORM.REF.		POZN.	Č. VÝKR.
PŘEZK.				TŘÍD. Č.	
TECHN.		SCHVÁLIL			
NÁZEV				04—KVS—VS—105—01—02	
KUSOVNÍK				Listů	List

Prohlášení k využívání výsledků DP :

Jsem si vědom toho, že diplomová práce je majetkem školy, že s ní nemohu sám bez svolení školy disponovat a že diplomová práce může být zapůjčena či prodána za účelem využití jejího obsahu.

Beru na vědomí, že po 5-ti letech mohu diplomovou práci vyžádat v Univerzitní knihovně TU v Liberci, kde je uložena.

Jméno a přímení : Petr Jahn

Adresa : Náklo č.p. 152 okr. Olomouc

Podpis : 