

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

OBRÁBĚNÍ PAPRSKEM LASERU

LASER BEAM MACHINING

AUTOR: Dominik Čech

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Pavel Novák, Ph.D.

PRAHA 2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čech** Jméno: **Dominik** Osobní číslo: **473490**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Obrábění paprskem laseru

Název bakalářské práce anglicky:

Laser beam machining

Pokyny pro vypracování:

- 1) Charakteristika a typy metod.
- 2) Oblasti využití.
- 3) Srovnání s ostatními výrobními metodami.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

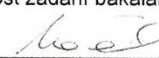
Ing. Pavel Novák, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

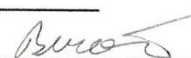
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Pavel Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

23.6.2020

Datum převzetí zadání

D. Čech

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá obráběním pomocí paprsku laseru. V této práci jsem postupně nastínil historii laserového paprsku, vysvětlil fyzikální princip laserového zařízení a vlastnosti laserového paprsku. Dále jsem popsal součásti laseru a rozdělil je dle aktivního prostředí a podle tříd bezpečnosti na pracovišti. Jsou představeny jednotlivé druhy laserů včetně novějších druhů. V práci jsem popsal oblasti využití paprsku v průmyslu i mimo něj a poté charakterizoval jednotlivé možnosti využití v praxi. V poslední kapitole jsem porovnal technologii obrábění laserem s konvenčními a ostatními nekonvenčními technologiemi obrábění a uvedl jejich výhody a nevýhody.

Klíčová slova

Laser, obrábění, řezání, vrtání, svařování, kalení, paprsek.

Abstract

This bachelor thesis deals with laser beam machining. In this work I gradually described the history of the laser beam, explained the physical principle of the laser device and the properties of the laser beam. I also described the components of the laser and divided them according to the active environment and according to safety classes in the workplace. Individual types of lasers are introduced, including newer types. In this work I described the areas of use of the beam in industry and others and then characterized the various possibilities of use in practice. In the last chapter, I compared the laser machining technology with conventional machining technology and other unconventional machining technology and mentioned its advantages and disadvantages.

Keywords

Laser, machining, cutting, drilling, welding, hardening, beam.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé práce panu Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Obsah

úvod	8
1 Princip, vlastnosti a historie laseru	9
1.1 Historie laseru	9
1.2 Princip laseru.....	9
1.2.1 Inverze populace.....	11
1.2.2 Stimulovaná emise.....	11
1.3 Vlastnosti laserového záření	12
1.3.1 Monochromaticnost	12
1.3.2 Koherentnost.....	12
1.3.3 Divergence.....	12
2 Hlavní součásti laseru.....	13
2.1 Rezonátor.....	13
2.2 Čerpání.....	14
2.3 Aktivní prostředí.....	14
3 Druhy laserů.....	15
3.1 Pevnolátkový laser.....	15
3.1.1 Rubínový laser	16
3.1.2 Nd - YAG laser	17
3.1.3 Nd – sklo laser.....	18
3.2 Plynový laser	18
3.2.1 Argonový laser	19
3.2.2 Helium-neonový laser	19
3.2.3 CO ₂ laser	20
3.2.4 Dusíkový laser	21
3.3 Kapalinový laser.....	21
3.4 Polovodičové lasery	22
3.5 Novější druhy laserů	22
3.5.1 Slab laser	22
3.5.2 Innoslab laser.....	24
3.5.3 Kotoučový laser	24
3.5.4 Vlákenný laser.....	26
4 Klasifikace laserů DLE BEZPEČNOSTI	27
4.1 Třída 1	28
4.2 Třída 1M.....	28
4.3 Třída 2	28
4.4 Třída 2M.....	29
4.5 Třída 3R.....	29

4.6	Třída 3B	29
4.7	Třída 4	30
5	Využití laserového paprsku	31
5.1	Laser v medicíně	31
5.1.1	Fofodynamická terapie	31
5.1.2	Dermatologie	32
5.1.3	Chirurgie	32
5.1.4	Léčba očí a zraku	33
5.1.5	Urologie	34
5.2	Laser v průmyslu	34
5.2.1	Řezání pomocí laseru	35
5.2.2	Vrtání pomocí laseru	36
5.2.3	Svařování pomocí laseru	38
5.2.4	Kalení pomocí laseru	40
5.2.5	3D obrábění pomocí laseru	41
5.2.6	Mikroobrábění pomocí laseru	41
5.2.7	Značení pomocí laseru	42
5.2.8	Laserové gravírování	44
5.3	Laser v ostatních odvětvích	45
5.3.1	Užití v oblasti geodézie i ekologie	45
5.3.2	Užití laserů v holografii	47
5.3.3	Separace izotopů	47
6	Porovnání konvenčních metod s technologií laseru	48
6.1	Laserová technologie	48
6.2	Konvenční obrábění	48
6.3	Hlavní rozdíly konvenčních a nekonvenčních metod obrábění	49
6.4	Výhody a nevýhody laserových metod	50
6.4.1	Metoda řezání [33, 34]	50
6.4.2	Metoda vrtání [35, 36, 37, 38]	51
6.4.3	Metoda svařování [39,40,41]	52
6.4.4	Metoda kalení [42,43]	53
6.4.5	Metoda značení [44]	54
	Závěr	55
	Seznam použité literatury	56
	Seznam obrázků	61

ÚVOD

Stále větší tlak na zlepšování procesů jak z ekonomického, tak praktického hlediska vede ke zdokonalování starých technologií, ale i k vývoji a zlepšování technologií nových. Tak stejně je to i v oblasti užití laserové technologie, jejíž prvopočátky a snaha o sestavení prvních přístrojů jsou datovány do období Starého Řecka.

V průběhu let byla podstoupena celá řada nových vědeckých pokusů a objevů, která vedla k ucelení informací a vzniku efektivních laserových přístrojů. Ta představují zesílení světla pomocí vybuzené emise záření, které je stále více využíváno v celé řadě odvětví.

Lasery nacházejí v současné době uplatnění například v holografii i geodézii. Mezi hlavní oblast využití těchto technologií patří v neposlední řadě také medicína, ale i průmysl. V rámci medicíny mohou být laserová zařízení využívána například k operacím očí, plastickým operacím či léčbě nádorového onemocnění. V rámci průmyslové výroby se lasery využívají k celé škále úkonů, které patří mezi jedny z nejvýkonnějších a nejpresnějších dnešní doby. V mnohých případech se však jedná o poměrně drahá zařízení, jiná však představují naopak finanční náročnost pouze pro prvotní zavedení do provozu. V průmyslu jsou lasery využívány například pro velice přesné a téměř bezporuchové svařování, řezání, kalení, vrtání a další.

V rámci teoretické části práce je proto nutné přiblížení historie a původu laserů, dále objasnění skladby zařízení a jejich klasifikace dle bezpečnostních tříd. Dalším cílem teoretické oblasti je přiblížení jednotlivých druhů laserů, jako jsou pevnolátkové, kapalinové, plynové a polovodičové lasery a využití jejich paprsků při procesu obrábění. Konkrétně budou blíže přiblíženy procesy řezání, vrtání, svařování a tepelné zpracování.

1 PRINCIP, VLASTNOSTI A HISTORIE LASERU

1.1 Historie laseru

Samotný název laseru je vyvozován z anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation,“ která lze přeložit jako metoda zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Klasické záření světla je charakterizováno jako elektromagnetické vlnění, které je šířeno do všech směrů. Zmiňované zesílení však způsobuje vytvoření úzkého svazku fotonů [1, 3].

Prvopočátky pokusů o sestavení laserových přístrojů a pokusů se světelnými paprsky pocházejí již z období Starého Řecka. Nicméně až do 17. století, nebyly tyto pokusy rozšířeny a zdokonaleny o nové poznatky. K vývoji přispěl Isaac Newton, který rozložil bílé světlo pomocí skleněného hranolu na barevné spektrum [1, 3].

Další teorie jak o šíření světla, principu vlnění či objev, že záření neboli světlo je tvořeno malými částicemi energie, byly zkoumány a rozvíjeny řadou vědců.

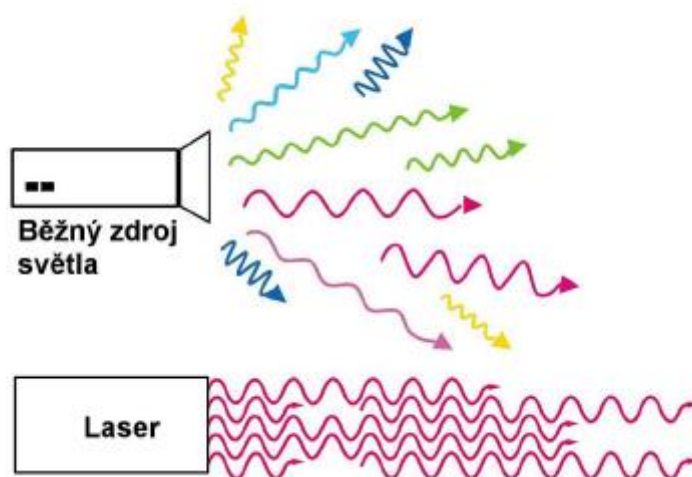
Samotná historie a prvopočátek laseru však vychází z teoretických základů o vynucené emisi záření, která byla poprvé vyjádřena Albertem Einsteinem až v roce 1917. Další kroky podstoupené k vývoji laseru byly uskutečněny ruským fyzikem V. A. Fabrikantem, který poukázal také na možnost využití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření, pro průchod prostředím. Tato idea byla následně realizována v rámci zesilování záření v mikrovlnné oblasti a vytvoření prvního molekulárního generátoru – maseru. Na vynálezu maseru se podíleli vědci Basov, Prochorov a Townes, kteří za toto společné úsilí získali Nobelovu cenu. První laser byl následně projektován zhruba šest let po realizaci prvního maseru vědci C. H. Townsem a A. L. Shalowem (1958) [1, 2, 3].

T. H. Maiman v roce 1960 poprvé sestavil a odzkoušel první rubínový laser, což vedlo k odzkoušení laserů ve směsi plynů neonu a hélia. Současně tak došlo rovněž k odstartování vývoje různých typů laserů a celé laserové technologie [3].

1.2 Princip laseru

Laser představuje zesílení světla pomocí vybuzené emise záření. Jak již bylo zmíněno, běžné světlo představuje elektromagnetické vlnění, které je šířeno do všech směrů. Právě zesílení docílí vytvoření úzkého svazku fotonů, do požadovaného směru [1, 3].

Laserové světlo je monochromatické neboli jednobarevné a má velmi malou rozbíhavost. Konkrétní znázornění rozdílu mezi běžným šířením světla ze zdroje a laserovým světlem je uvedeno na obrázku č. 1.



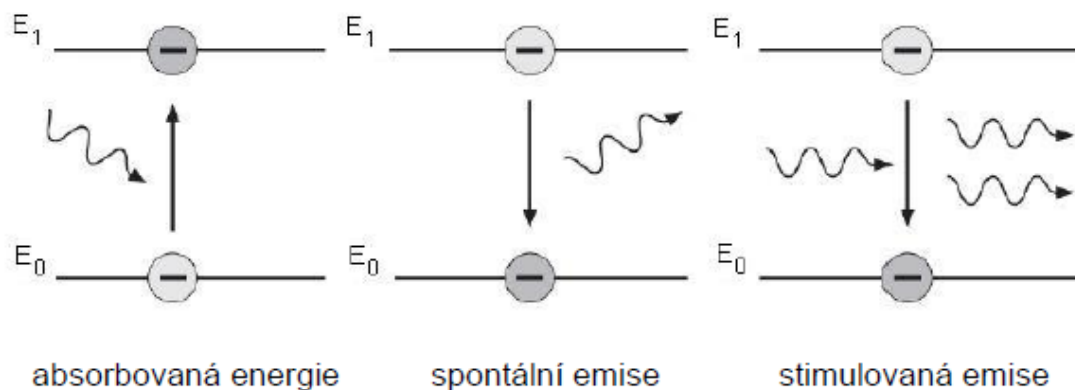
Obrázek 1 Znázornění rozdílu běžného zdroje světla a laserového světla [3].

Samotný princip laseru vysvětluje kvantová fyzika. Tento princip vychází z faktu, že elektrony se pohybují kolem kladně nabitého jádra po uzavřených drahách, za současného působení elektrostatických sil. Každé hladině tak náleží určité množství energie. Čím vzdálenější je dráha elektronu od jádra, tím větší množství energie ji přísluší. To znamená, že k překonání přitažlivé síly protonu je zapotřebí vykonání větší práce. Čím je dráha elektronu blíže jádru, tím menší je i jeho energie [2, 3].

Za normálních podmínek se atom nachází v základním stavu, tudíž ve stavu s nejmenší energií. Elektrony se v takovém případě mohou nacházet pouze na příslušných hladinách a změny energií nemohou probíhat plynule, ale po skocích odpovídajících drahám, ve kterých se elektron může nacházet. V takovém případě dochází k dvojímu jevu, kdy záření může být buď pohlcováno, tedy proces absorpce nebo vysíláno, tedy proces emise [1, 3].

Rozdíl mezi běžným zdrojem světla a laserovým zářením tak vzniká v určitém prostředí stimulujícího elektromagnetického záření právě potlačením spontánní emise na úkor emise stimulované. Spontánní emisí se rozumí stav, kdy atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci obsadit hladinu s nižší energií (E_1), čímž emitují kvantum světelného záření [2].

Vnější podnětem se může vybuzený atom vrátit do základního stavu. Tento jev probíhá za současné emise nového kvanta se stejnou frekvencí původního kvanta (emise stimulovaná) [3]. Přechod elektronu mezi hladinami je uveden na obrázku č. 2.



Obrázek 2 Znáznornění přechodu elektronu mezi hladinami [2].

Právě v závislosti na rozdílu energetických hladin dochází ke vzniku infračerveného, ultrafialového či viditelného světelného záření.

1.2.1 Inverze populace

Inverze populace představuje jev, kdy na vybuzené hladině se nachází více elektronů než na základní hladině. Tohoto jevu lze docílit správným čerpáním aktivní látky, které může být provedeno opticky za užití diody či výbojky, elektricky, chemicky nebo jadernými reakcemi.

1.2.2 Stimulovaná emise

Stimulovaná emise představuje děj, kdy foton o dané frekvenci dopadá na atom, který je ve vyšším energetickém stavu E_2 a zajistí jeho přechod na nižší energetický stav E_1 , za současného vyzáření dalšího fotonu. Oba fotony se dále pohybují stejným směrem, neboli směrem fotonu, který danou emisí vyvolal. Jejich pohyb je synchronizován a odpovídá jak stejné frekvenci, tak stejné fázi. Záření s těmito vlastnostmi je označováno jako koherentní [10].

1.3 Vlastnosti laserového záření

Laserové zařízení využívá k získání světelného paprsku takzvanou stimulovanou emisi záření.

1.3.1 Monochromaticnost

Mezi hlavní vlastnosti laserového paprsku patří jeho monochromaticnost. To znamená, že produkované světlo je jednobarevné a prakticky vykazuje pouze jednu vlnovou délku. Dle vlnové délky jsou dále určovány části spektra, ve kterém se daný laserový paprsek pohybuje.

Laserové světlo je monochromatické a jeho paprsky jsou rovnoběžné. Proto jej lze jednoduše soustředit do velice intenzivního bodového svazku.

Důležitou podmínkou monochromaticnosti je fakt, že zesílení elektromagnetických vln nastává jen za frekvence rovné $f = (E_2 - E_1)/h$.

Kde

f ... frekvence [Hz]

E_2 ... energie excitovaného elektronu [J]

E_1 ... energie elektronu v základním stavu [J]

h ... Planckova konstanta $6,626 \cdot 10^{-34}$ [J.s]

1.3.2 Koherentnost

Laserové záření má rovněž vysoký stupeň jak prostorové, tak časové uspořádanosti. Jinými slovy jde o koherenci.

Koherence představuje jev, kdy veškeré částice dané světelné vlny kmitají v kolmé rovině na směr šíření paprsku se stejnou fází a veškeré částice světelné vlny kmitají rovněž ve směru šíření paprsku se stejnou fází.

1.3.3 Divergence

Divergence neboli rozbíhavost záření představuje vyjádření šíření světelného paprsku prostředím. Záření prostupuje prostředím úzkým svazkem s nepatrnou divergencí, čímž je schopno působit na velmi malou plochu o extrémně vysoké hustotě výkonu.

2 HLAVNÍ SOUČÁSTI LASERU

Každé laserové zařízení se skládá z několika hlavních částí. Jedná se o laserové médium neboli aktivní látku, čerpání a rezonátor.

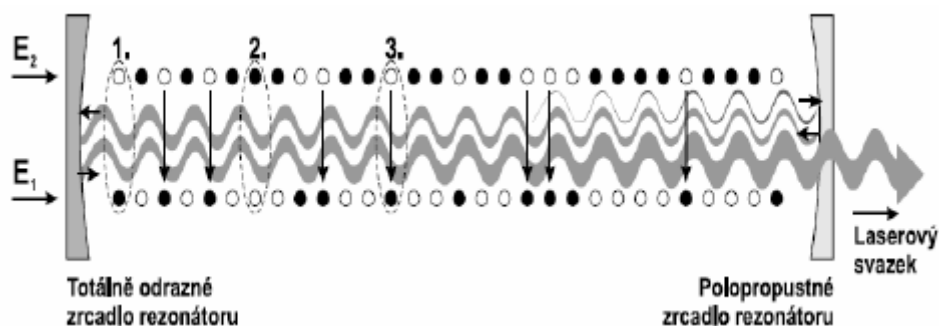
2.1 Rezonátor

Rezonátor představuje polopropustné a nepropustné zrcadlo, které vrací emise záření zpět do laserového média. Lze tedy říci, že rezonátor je v podstatě dutina, do které je vkládána aktivní látka, která dále zajišťuje zpětnou vazbu. Princip spočívá v užití nejčastěji dvou proti sobě umístěných rovinných či sférických zrcadel, přičemž jedno je vždy polopropustné a druhé pouze odrazové. Emitovaná vlna je tak z aktivní látky odražena zpátky, kdy při zpětném pohybu vzbuzuje další a nové emise fotonů [2, 3].

Jakmile však dojde k překročení prahové výkonné hustoty polopropustného zrcadla, dojde k výstupu fotonů z rezonátoru ven, čímž dojde k emitování záření přesně na vlnové délce daného aktivního prostředí [2].

Aktivní prostředí je voleno za účelem získání co nejlepších vlastností. Především zde dochází k vytvoření inverze populace energetických hladin elektronů a zajištění kladné zpětné vazby pomocí otevřeného rezonátoru. Tímto lze docílit správného zesílení generovaného záření [2, 3].

Princip rezonátoru je znázorněn na obrázku číslo 3. Jedná se o znázornění kvantové soustavy v základním stavu (č. 1), ve stavu excitace (č.2) a stimulované emisi (č. 3). Energetické hladiny kvantové soustavy jsou vyjádřeny pomocí E_1 a E_2 .



Obrázek 3 Znázornění rezonátoru [2].

2.2 Čerpání

Čerpání představuje způsob jakým dodáme excitační energii do aktivního prostředí. Zdroj excitační energie závisí na volbě aktivního prostředí. Buzení tak může být realizováno mnoha způsoby. Například může jít o elektrický výboj, elektronový paprsek, ultrafialové světlo, teplo, chemickou reakci, jadernou reakci, expanzi plynu či jiné zdroje [2, 3].

Vhodným způsobem čerpání elektrické látky lze docílit inverze populace. Jedná se o situaci, při které dochází na vybuzené hladině ke kumulaci více elektronů než na samotné základní hladině. Čerpání tedy představuje proces, kterým je do aktivního prostředí dodávána excitační energie. Zdroje samotného buzení neboli čerpání mohou pracovat dvojitým způsobem a to buď kontinuálně nebo pulzně. Pod pojmem excitace si lze představit děj, při kterém dochází k přechodu kvantové soustavy ze stavu s nižší energií do stavu s energií vyšší. Tento jev je podmíněn příjmem přesného množství excitační energie charakteristické pro daný přechod, která odpovídá rozdílu hodnot energie soustavy před a po samotné excitaci [2, 3].

2.3 Aktivní prostředí

Aktivní prostředí představuje látku, která umožňuje vybudit molekuly a elektrony za pomoci vhodného čerpání na požadovanou energetickou hladinu, ze které může dále záření emitovat. Jedná se o jednu z nejdůležitějších částí laseru, ve které dochází ke stimulované emisi [3, 7].

Aktivní prostředí může tvořit plyn, kapalina, pevná látka, polovodič nebo plazma. V případě pracovní látky plynného skupenství se jedná například o využívání helia a neonu či oxidu uhličitého. V případě užití kapaliny jde o rhodamin 6G a u krystalu například o rubín [2].

3 DRUHY LASERŮ

3.1 Pevnolátkový laser

Pevnolátkové lasery využívají pro aktivní prostředí především pevné krystalické látky. Kromě krystalických látek však mohou využívat pro aktivní prostředí také amorfní látky s příměsí vhodných iontů. Tyto pevné fáze však tvoří pouze nosný skelet aktivního prostředí.

Jejich činnost spočívá především v pulzním režimu, kdy k zesilování dochází na elektronových přechodech iontů příměsí. V případě pevnolátkových laserů využívajících krystalické látky, jsou aktivní ionty zabudovány přímo v krystalové mřížce, což zajišťuje jejich stálou, stejně orientovanou polohu v silovém poli dané mřížky [2, 8].

Mimo jiné jsou zde také příměsi iontů vzácných zemin, které jsou vystaveny působení velkých vazbových sil, které dále ovlivňují energetické hladiny valenčních elektronů. Tento fakt vede k posunu, štěpení a rozšiřování energetických hladin [2, 3, 8].

U pevnolátkových laserů je k optickému vybuzení využívána především výbojka, která způsobí změnu v obsazení energetických hladin. Činnost laserů může probíhat v různých režimech i v odlišných provozních podmínkách. Jejich funkce je stabilní, bez potřeby složitějších úkonů údržby [2, 4, 8, 9].

Specifikum pevnolátkových laserů je jejich záření o vlnové délce v oblasti infračerveného až viditelného světla.

Pevnolátkové lasery lze dále rozčlenit do několika skupin. Mezi nejznámější patří:

- rubínový laser
- Nd - YAG laser
- Nd – sklo laser
- diodové lasery

3.1.1 Rubínový laser

Rubínový laser patří mezi první, skutečně fungující zařízení. Jeho vznik je datován do roku 1960, Theodorem H. Maimanem. Aktivní prostředí je tvořeno krystalem Al_2O_3 s ionty Cr^{3+} [2].

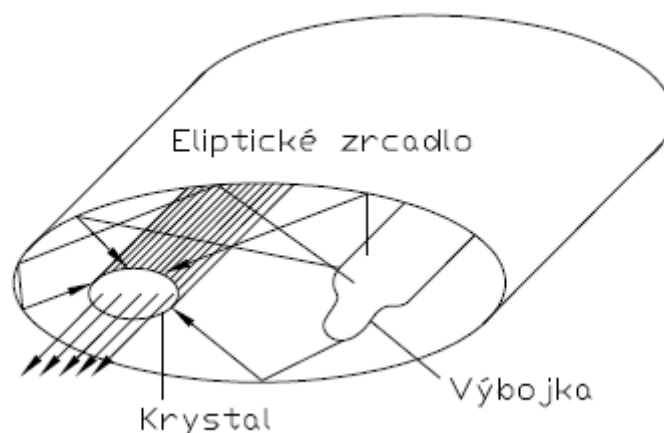
Monokrystaly rubínu jsou získávány pomalým ochlazováním taveniny Al_2O_3 , ve které jsou rovnoměrně rozptýleny ionty trojmocného chrómu. Je-li krystal vystaven dostatečně intenzivnímu impulsu světla o potřebné vlnové délce, dochází k excitaci iontů chrómu, přičemž při splnění dalších podmínek může být stimulovaná emise i zesílena [2, 3].

Práce rubínového laseru probíhá v pulsním režimu, při kterém vyzařuje červené světlo o vlnové délce 694,3 nanometrů. Výstupní impuls by měl být, vzhledem k dosažení co největší časové koncentrace energie aneb největší hustoty zářivého toku, co nejkratší. Budící impuls proto trvá několik desetin milisekundy až jednu milisekundu. Pro získání co nejoptimálnějších podmínek může být rubínový laser konstrukčně upraven, přičemž výsledná doba impulsu se pak může pohybovat řádově od 10^{-9} až 10^{-12} sekundy [3, 4].

V případě užití těchto laserů dochází při čerpání energie k silnému zahřívání. Proto je při kontinuálním provozu nutné zařazení rovněž kvalitního chlazení celého zařízení [2].

Uplatnění rubínových laserů může být jak v průmyslovém odvětví a to konkrétně k vrtání velmi tvrdých materiálů, ale také v lékařské dermatologii či v rámci laserové lokace družic [4].

Znázornění konstrukce rubínového laseru je uvedena na obrázku č. 4.



Obrázek 4 Rubínový laser [6].

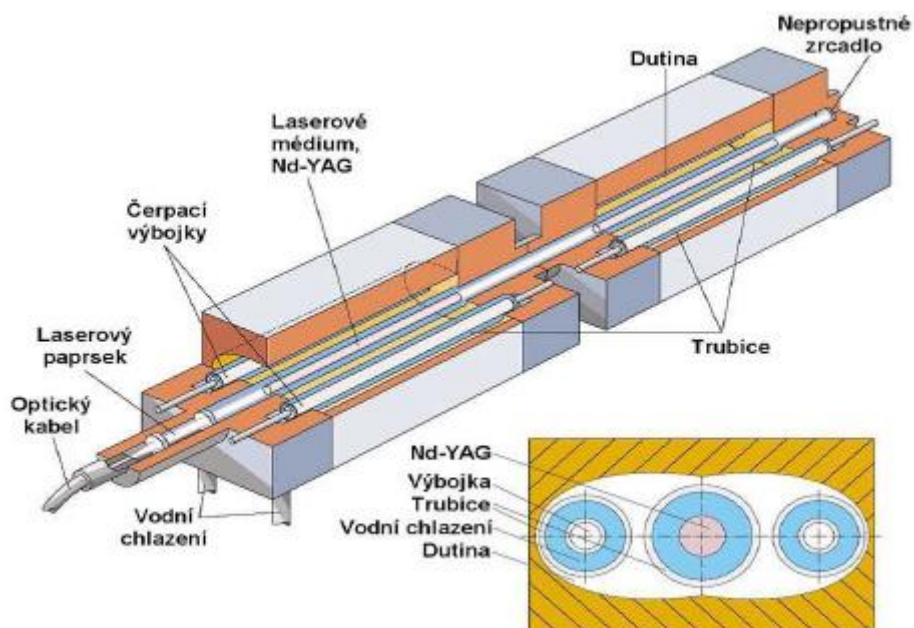
3.1.2 Nd - YAG laser

Nd – YAG lasery patří mezi další významné zástupce laserů. V těchto laserech se využívá pro aktivní prvek neodým.

Oplývá značnými výhodami a dobrými vlastnostmi, které jsou schopny pracovat v celé řadě nosných prostředí. Jeho hlavní výhodou je funkční čtyřhranový mechanismus, což znamená, že k funkci laseru je zapotřebí nízká prahová hodnota [7, 9].

Tyto lasery jsou založeny na funkci krystalu yttriumaluminogranátu, který tvoří nosné prostředí pro ionty Nd^{3+} . Ačkoli jsou tyto lasery schopné pracovat na celé řadě infračervených vlnových délek, které se nacházejí velmi blízko sebe, je přesto využíván pouze na vlnové délce 1060 nm. Jeho funkce však může probíhat jak v kontinuálním, tak pouze v pulzním prostředí. Při užívání je vždy část energie výbojky transformována na teplo a proto je nutné toto přebytečné teplo odvádět. V případě opomenutí odvodu přebytečného tepla by mohlo dojít k přehřátí jak krystalu, tak výbojky. Schéma laseru využívající Nd-YAG laser je uvedeno na obrázku č. 5 [3, 8, 9, 11].

Nd – YAG lasery jsou nejčastěji využívány k vrtání, řezání, žihání a svařování [4].



Obrázek 5 Pevnolátkový laser s Nd-YAG krystalem [6].

3.1.3 Nd – sklo laser

Výroba Nd – sklo laseru je o něco snadnější, než v případě Nd – YAG laseru. Hlavním důvodem je snadnější výroba aktivního prostředí ve formě skla, ve kterém jsou rozptýleny Nd^{3+} ionty, na rozdíl od výroby monokrystalů. Hlavní rozdíl mezi lasery využívající jako amorfni prostředí sklo nebo krystal se projeví pouze výraznějším rozšířením absorpčních i emisních čar [3].

V důsledku dobré optické homogenity jsou lasery s aktivním prostředím ze skla účinnější, než při použití laserů s krystaly. Naopak nevýhodou je velmi malá tepelná vodivost, což způsobuje, že tyto lasery nelze používat pro impulsy s vysokou opakovací frekvencí ani pro kontinuální režim. Jeho práce tedy probíhá v pulzním režimu, pro malé opakovací frekvence [7, 3].

3.2 Plynový laser

Plynové lasery jsou charakterizovány aktivním prostředím v plynné formě, které je tvořeno buď konkrétními plyny, případně směsí plynů umístěných ve skleněné trubici. Na rozdíl od pevnolátkových laserů pracují především jako zdroje kontinuálně stimulovaného záření o větším rozsahu vlnových délek. Vybuzení může být proveditelné buď elektrickým výbojem, chemickou reakcí, opticky nebo průchodem svazků rychlých elektronů. Výhodou plynových laserů je v důsledku jejich homogenity menší deformovatelnost optického svazku během průchodu aktivním prostředím. Ovšem kromě pozitivních vlivů mají plynové lasery také své nevýhody. Negativním vlivem je například jejich nízká objemová hustota množství částic, což způsobuje malé objemové výstupní výkony [3, 7, 8, 9].

Mezi základní zástupce plynových laserů patří:

- argonový laser
- heliumneonový laser
- excimerový laser
- CO_2 laser
- dusíkový laser

3.2.1 Argonový laser

Argonový laser se řadí mezi nejvýkonnější plynové lasery, přičemž aktivní prostředí je tvořeno ionty argonu. Vytváří záření, které se nachází ve viditelné oblasti spektra a je buzeno elektrickým výbojem [3].

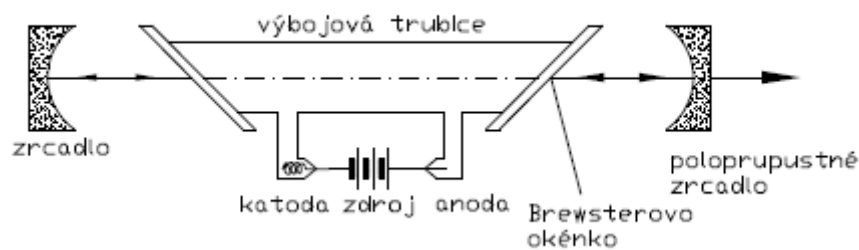
3.2.2 Helium-neonový laser

V případě helium-neonového laseru je aktivní prostředí tvořeno atomy neonu, přičemž buzení probíhá elektrickým výbojem. Tento typ laserů patří mezi jeden z nejvyužívanějších kontinuálních zdrojů stimulovaného záření. Jeho využití dnes nachází opodstatnění především v oblasti měřicí techniky, konkrétně v geodézii.

Práce helium-neonových laserů může být prováděna na několika vlnových délkách. Dle výkonu se dělí na:

- Lasery s malým výkonem (0,1 – 2 mW) o vlnové délce 633 nm
- Lasery se středním výkonem (2,5 – 15 mW) s využitím vlnových délek 633 nm a 1150 nm
- Lasery s velkým výkonem (20 – 60 mW) s možností využití vlnových délek 633 nm, 1150 nm a 3390 nm [3, 4].

Konstrukce helium – neonového laseru je znázorněna na obrázku č. 6.



Obrázek 6 Schéma helium neonového laseru [6].

3.2.3 CO₂ laser

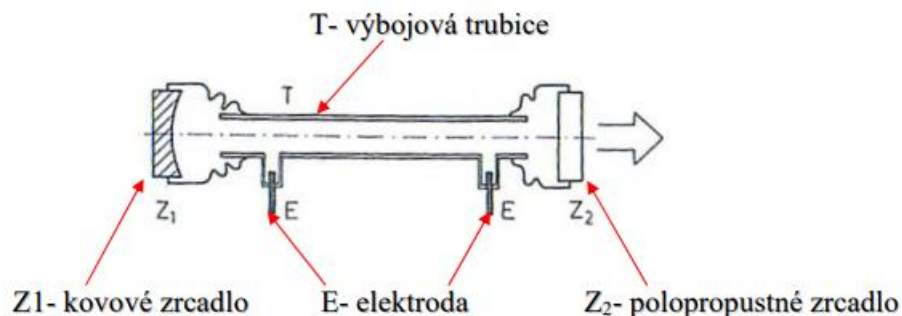
Lasery s aktivním prostředím z oxidu uhličitého jsou považovány za nejvýkonnější zástupce plynových laserů, které vyzařují vysoce monochromatické světlo. Aktivní médium je z pravidla tvořeno směsí oxidu uhličitého, hélia a dusíku [4, 12].

Jednou z nejdůležitějších vlastností je zajištění čistoty plynů. Tyto lasery jsou schopny vyzařovat světlo o vlnové délce 1060 nm, které je možno vybudit působením jednosměrného či střídavého napětí. Velká trubice pro plynou látku umožňuje získat vysoké výkony až 100 kW [3, 4].

Elektrický výboj je zapalován ve směsi plynů CO₂, N₂ a He, kterými je naplněna výbojová trubice v poměru 1:2:8. Výstupní výkon je tak ovlivňován především rychlostí odvádění tepla z trubice, kdy k výměně tepla s okolím dochází díky srážkami uskutečněnými mezi heliem a trubicí. Jestliže je teplo příliš velké, je možné trubicí laseru chladit. Chlazení trubice však vede ke snížení účinnosti laseru [3, 4, 12].

CO₂ lasery lze použít pro širokou škálu úkonů. Lasery o výkonu 500 W – 6000 W lze použít například pro řezání ocelových plechů až do tloušťky 25 mm. Dále je využíváno k řezání trubek a profilů nejen ocele, ale také hliníku a mosazi. Využití výkonu nad 6000 W lze rovněž použít i v rámci velkosériové výroby, speciálně v rámci procesu svařování [3, 11, 12].

Nevýhodou těchto laserů však je obtížnost vedení výstupního paprsku k místu jeho užití. Tato komplikace byla částečně vyřešena novou koncepcí přístroje, kdy laser je umístěn přímo na kloubové rameno výkonného robota, čímž došlo ke snížení hmotnosti samotného laseru a zkrácení optické cesty paprsku [3, 12].



Obrázek 7 Schéma konstrukčního provedení CO₂ laseru [3].

3.2.4 Dusíkový laser

Laser dusíkový je řazen mezi nejjednodušší lasery buzené výbojem. Aktivní prostředí je v tomto případě tvořeno molekulárním dusíkem. Je však možné použít i pouze vzduch, který je tvořen alespoň z 80% dusíkem [13].

Dusíkový laser funguje na podobných principech jako pevnolátkové lasery. Na rozdíl od nich jsou však levnější, výkonnější a spolehlivější. Hlavní výhodou užití dusíkových laserů je, že mohou pracovat v kontinuálním režimu [13].

3.3 Kapalinový laser

Kapalinové neboli barvivové lasery mají aktivní prostředí tvořeno převážně roztoky organických barviv nebo kapalinami obohacenými ionty vzácných zemin. Ionty organických barviv tak mohou být obsaženy v různých kapalných rozpouštědlech jako je například voda, metylalkohol, etylalkohol, toluen, benzen, glycerin a jiné [4, 14].

Vzhledem k možnostem aktivního prostředí lze kapalinové lasery užívat na různých vlnových délkách od 383 nm až po 1015 nm. Mezi nejvýznamnější barviva tak patří Rhodamin 6G, Fluorescein a další [8].

K buzení je využíváno u kapalinových laserů optického záření, které může být nekoherentní, koherentní, pulsní, kontinuální, příčné i podélné. V rámci koherentního buzení dochází k ozařování aktivního prostředí pomocného laseru na kmitočtu odpovídajícího stejnému absorpčnímu pásmu konkrétního barviva [8, 14].

Největší užití barvivových laserů je proto uplatňováno ve spektrometrii, avšak velmi důležitou funkci zastávají tyto lasery rovněž v medicíně, konkrétně ve fotodynamické terapii. Vlnové délky o přesných hodnotách tak mohou být nasměrovány k působení na konkrétní oblast, kde mohou ničit rakovinný nádor. Princip zničení rakovinného nádoru spočívá v jeho napuštění speciálním konkrétním barvivem, které se v důsledku působení laserového záření rozpadá, přičemž volný generovaný kyslík následně ničí nežádoucí buňky [3, 4, 9, 14].

3.4 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery využívají pro aktivní prostředí příměsově polovodiče nebo polovodič vlastní. Aktivní částice tak představují jak díry, tak nerovnovážné elektrony. Buzení lze navodit dvojnásobem, elektrickým svazkem nebo elektrickým proudem [14].

Výhodou těchto laserů je jejich kompaktnost a účinnost, která může dosáhnout až 50%. Další klad je možnost užití neboli přeladění laseru v širokém pásmu vlnových délek. Jde o vlnové délky od 300 nm do 3000 nm. Naopak negativní stránkou polovodičových laserů je rozbíhavost generovaného paprsku, která závisí na teplotě aktivního polovodičového materiálu. Chlazení je proto řazeno mezi jeden z hlavních problémů těchto laserů, a proto je možné generovat záření polovodičových laserů především při nízkých teplotách [3, 13, 14].

Mezi zástupce těchto laserů je řazen diodový laser, kdy aktivní prostředí je tvořeno blokem polovodičů z galium arsenidu, kadmium sulfidu nebo kadmium selenu, kdy výstupní paprsek je vyznačován obdélníkovými plochami. Diodové lasery jsou schopny docílit výkonu 30 W až 800 W. Dalším zástupcem je injekční polovodičový laser, který vyniká skladbou aktivního prostředí, které je tvořeno polovodiči typu P a N, které dohromady vytvářejí takzvaný PN přechod. Mezi nejznámější laser zde patří polovodičový GaAs laser [4, 13, 14].

Využití polovodičových laserů se nachází v oblastech svařování, popisování daných součástí i při řezání [4].

3.5 Novější druhy laserů

V posledních letech, zvláště od 90. let minulého století, jsou stále více zdokonalovány a rozvíjeny laserové přístroje a technologie. Mezi nejzásadnější důvody nových vynálezů a začleňování nových typů laserů do praxe je snaha o realizaci konstrukčních řešení, které dříve nebylo možné uskutečnit.

Hlavním cílem rozvoje a začleňování nových technologií do průmyslu je snaha o získání kvalitnějších laserových paprsků a s ní související vyšší hustotou jeho výkonu.

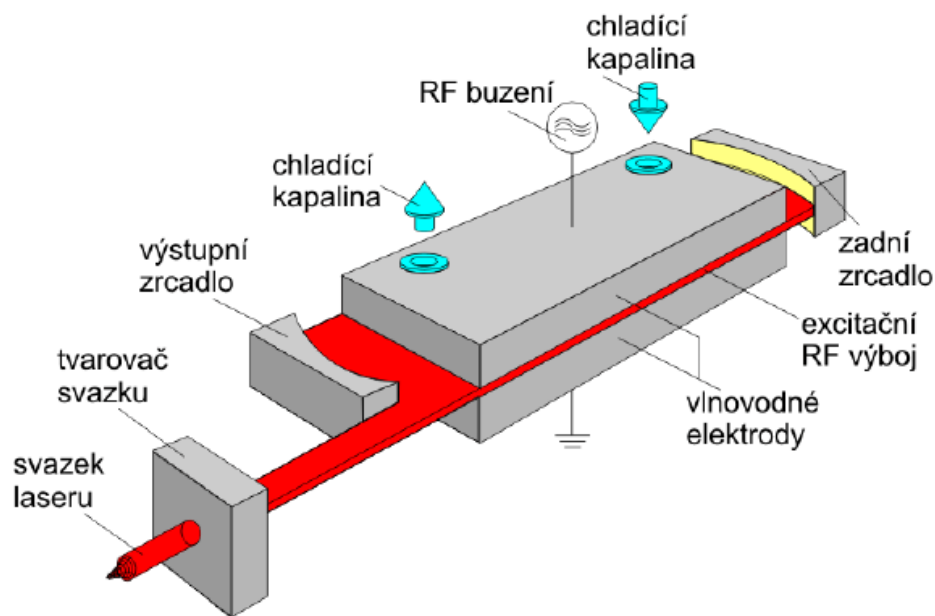
3.5.1 Slab laser

Slab lasery se řadí do kompaktních CO₂ laserů s velkoplošnými měděnými elektrodami a vysokofrekvenčním buzením.

Na rozdíl od jiných typů laserů jsou slab lasery chlazeny vodou, která prochází skrz elektrody. Nadměrné teplo nutné k odvodu vzniká, tak jako u jiných typů laseru, buzením. Znárodnění konstrukce slab laserů je uveden na obrázku číslo 8 [5, 19].

Slab lasery vynikají především nízkými servisními náklady. Vzhledem ke svému kompaktnímu rozměru mohou být často vestavěny do celého systému. Další výhodou je produkce velmi kvalitního paprsku, čímž je zajištěna lepší jakost povrchu řezu. Nejvýkonnější slab lasery dosahují hodnoty výkonu až okolo 8 kW [5, 19].

V případě výkonnějších slab laserů se nachází jejich využití především v oblasti řezání a svařování oceli. Využití však má i při práci s plasty a dřevem.



Obrázek 8 Schéma konstrukce slab laseru [8].

3.5.2 Innoslab laser

Innoslab laser jež je obdobnou verzí slab laseru, představuje kompaktní pevnolátkový laser, který je opatřen krystalem připomínajícím desku. Důvod takto zvoleného tvaru krystalu je lepší způsob chlazení a získání výborné kvality paprsku. U laserů v pulzním režimu jsou schopny pracovat v krátkých pulzech. Chlazení innoslab laserů může být zajišťováno dvojitým způsobem, vodou nebo vzduchem [5, 19].

Innoslab lasery jsou využívány v průmyslovém odvětví k vytváření otvorů a děr s poměrem délky k průměru 300:1 do různých materiálů. Možnost užití těchto laserů při práci se dřevem, plasty, kovy ale i keramikou a sklem dokazuje, že tato nová technologie je velice přesná a spolehlivá.

Na rozdíl od slab laserů jsou innoslab lasery vyráběny ve verzi nízko výkonných, středně výkonných i vysoko výkonných verzích. Průměrné výkony u daných přístrojů se tak mohou pohybovat od 40 W až po 600 W u verze s pulzním režimem. Vlnová délka vyzařujícího paprsku je 1064 nm s možností na přeladění na 266 nm, 355 nm a 532 nm [5, 19].

3.5.3 Kotoučový laser

Krystal kotoučového laseru vyniká na rozdíl od pevnolátkových laserů svým rozdílným tvarem. V případě pevnolátkových laserů jsou aktivní lasery válcovitého tvaru, kdežto u kotoučových laserů jsou užity krystaly ve formě tenkého kotouče o maximální tloušťce několika milimetrů [5, 19].

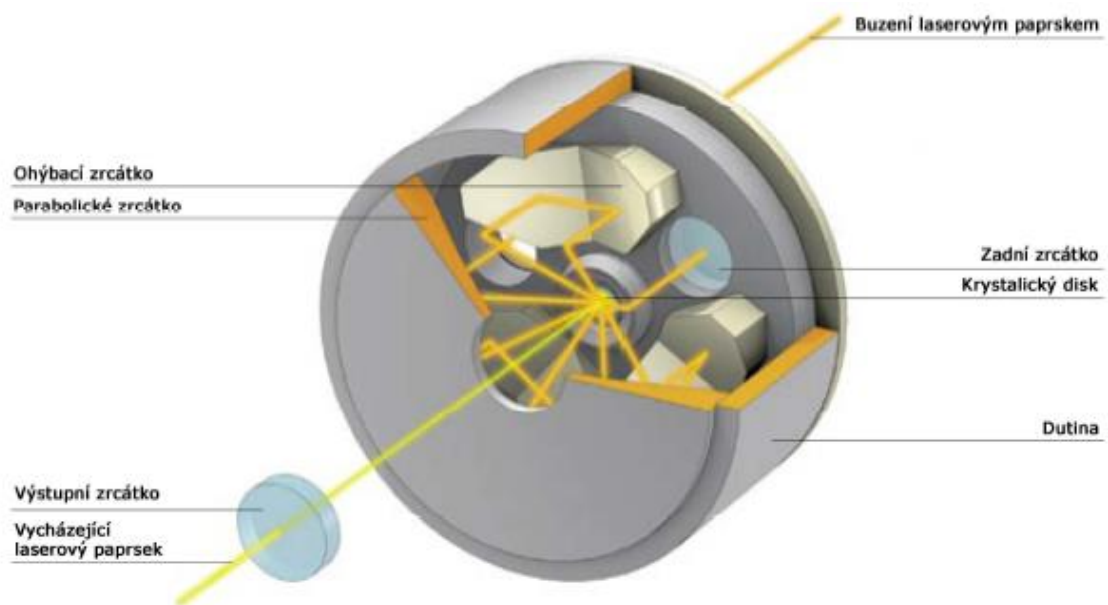
Kotouče laserů jsou z jedné strany chlazeny vzduchem, přičemž na druhé straně kotouče dochází k buzení. Principem buzení je přechod záření vycházející z laserové diody přes odrážející vrstvu kotouče a okolní reflektory. Tento princip uspořádání má vliv na získání jemného zaostření vyzařujících paprsků a na zvýšení jejich hloubky ostrosti [5, 19].

Kotoučové lasery jsou velice výkonné a ani při rostoucím výkonu nedochází k poklesu kvality výstupních paprsků.

Hlavní výhodou těchto laserů je zvýšení rychlosti procesu řezání a svařování, zatímco vliv na okolí řezu či svaru je během procesu stále snižován. V současné době jsou využívány varianty o výkonu 1 kW, 3 kW, 6 kW, a 8 kW [5, 19].

Vzhledem k možnosti pohlcovat paprsek celou tloušťkou skla a vhodnou konstrukcí zrcadel, můžou tyto lasery dosahovat vícenásobné absorpce, což v praxi umožňuje svařování i měděných plechů.

Schéma konstrukce kotoučových laserů je uvedeno na obrázku č. 9.



Obrázek 9 Schéma konstrukce kotoučového laseru [5].

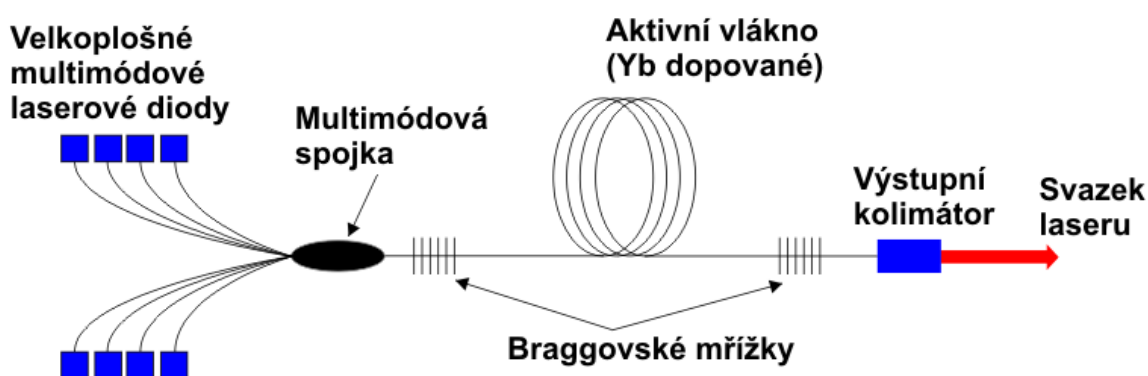
3.5.4 Vlákenný laser

Vlákenný laser vyniká možností generování záření, které probíhá v jádru optického vlákna, které je dopováno chemickými prvky ze skupiny lanthanoidů. Princip optického vlákna je velmi podobný funkci krystalu u pevnolátkových laserů [5, 19].

Lasery s generujícím zářením v jádru optického vlákna jsou chlazeny vzduchem, bez složitého nastavování rezonátorů a speciálních optik. Specifikací těchto laserů je jejich velmi nízký příkon za současné vysoké kvality paprsku, která při 100 W může dosáhnout fokusace vyzařovaného paprsku pod 5 mm.

Mezi hlavní výhody užití vláknových laserů jsou velmi nízké provozní náklady. To souvisí také s tím, že tato zařízení jsou bezúdržbová a jejich životnost je odhadována na 100 000 hodin. Pracovní režim lze nastavit jak v pulzním, tak kontinuálním režimu [5, 19].

V rámci pulzního režimu může být délka pulzu měněna v rozmezí 30 ns – 100 ns [19].



Obrázek 10 Schéma vláknového laseru [29]

4 KLASIFIKACE LASERŮ DLE BEZPEČNOSTI

V důsledku výrazného záření a výkonu laseru o dané vlnové délce je při expozici laserového záření na člověka možný výskyt rizik, které se u jiných technologií nevyskytují.

Obdobná ochrana proti výraznému záření tak u člověka nastává při pohledu do slunce, kdy dojde k okamžitému odvrácení hlavy a zavření očí. Nicméně v oblasti užití laserových zařízení jsou tyto reflexy příliš pomalé a může dojít k poškození zdraví. Z tohoto důvodu jsou laserová zařízení rozdělena celkem do sedmi skupin, charakteristických dle tříd bezpečnosti.

Lasery lze tedy klasifikovat do skupin:

- Třída 1
- Třída 1M
- Třída 2
- Třída 2M
- Třída 3R
- Třída 3B
- Třída 4

Tyto skupiny budou přiblíženy v jednotlivých podkapitolách.

Hlavním důvodem rozdělení laserů do tříd bezpečnosti je snadnější zhodnocení rizik laseru a stanovení nezbytných opatření. Klasifikace je však rozdělena dle potenciálních rizik laserového záření na poškození pokožky či očí. Nezahrnuje však rizika jako elektrická, mechanická či chemická, která mohou být vyvolána sekundárním zářením.

Pracoviště s lasery musí být označeno bezpečnostní tabulkou nebo samolepkou na všech přístupových cestách a místech, kde hrozí nebezpečí zasažení zářením.



Obrázek 11 Bezpečnostní symbol laseru třídy 2 a vyšší [27].

4.1 Třída 1

Lasery Třídy 1 jsou považovány za bezpečné v rámci provozních podmínek. Lze je sledovat pomocí optických přístrojů, jako je lupa nebo dalekohled, přičemž lze předvídat s dostatečně velkou pravděpodobností jejich průběh. Umístění laserů první třídy je ve zcela uzavřeném krytu, bez jakéhokoli rizika „úniku“ laserového svazku mimo požadovaný směr [25]

Dlouhodobé působení na lidský organismus nemá škodlivý vliv na zdraví jedince a je považován za bezpečný i vzhledem k působení na oči. Pouze pohled do svazku laserových zařízení této třídy mohou způsobovat oslňující optické efekty. Zvláště v případech, kdy je úroveň osvětlení okolí nízká [25, 27].

Přípustný výkon zdroje je $1,2 \cdot 10^{-4}$ W až $8 \cdot 10^{-4}$ W v pásmu o vlnových délkách 500 – 1550 nm.

4.2 Třída 1M

Třída 1M je stejně jako lasery Třídy 1 bezpečná za provozních podmínek, které lze předpokládat s dostatečně velkým odstupem a pravděpodobností. Nebezpečí je minimalizováno při sledování svazku pouze očima, avšak při užití optických přístrojů jako je například dalekohled se i tyto, původně bezpečné lasery, stávají lasery nebezpečnými [26, 27]

Vyzařování je v rozsahu vlnových délek od 302,5 nm až do 400 nm. Rozsah vlnových délek je tedy již omezen a to do spektrální oblasti [25].

Stejně jako u laserů Třídy 1 může pohled do svazku způsobit oslňující optické efekty.

4.3 Třída 2

Lasery Třídy 2 jsou bezpečné pro lidský zrak pouze v případě, kdy je působení na oči velmi krátké. Viditelné záření je laserem vyzařováno v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm, přičemž ochrana zraku je zajištěna běžnými reflexy v podobě mrknutí a podobně. Tato běžná reakce může být jako ochrana při běžných podmínkách použití dostačující, přičemž tyto podmínky lze předpokládat s dostatečně velkou pravděpodobností, včetně užití optických přístrojů [25, 26, 27].

Nebezpečnými mohou být v případě záměrného pohledu do svazku. Výkon zdroje u laserů Třídy 2 nepřekračuje viditelné pásmo $1 \cdot 10^{-3}$ W.

4.4 Třída 2M

Lasery spadající do Třídy 2M představují zařízení, která rovněž vyzařují viditelné laserové svazky, bezpečné při krátkodobém ozáření očí bez optických pomůcek. Při užití optických pomůcek může dojít k překročení přípustné dávky ozáření a k možnému poranění zraku [26].

Stejně jako u laserů Třídy 2 může dojít k oslnění a laserové slepotě při ozáření za současného nízkého osvětlení okolního prostředí.

4.5 Třída 3R

Vyzařování laserů se pohybuje v rozmezí vlnových délek od 106 nm až do 302,5 nm, u kterých je přímé sledování uvnitř svazku potenciálně nebezpečné. Je nutno však podotknout, že jejich úroveň nebezpečí je v tomto případě menší než u laserů třídy 3B [27].

V rámci krátkodobé a náhodné expozice by vliv na organismus nemusel být nebezpečný. Riziko poškození je relativně nízké. Limit přístupné emise je pro tuto třídu totiž jen pětinásobek limitu přístupné emise třídy 2 nebo třídy 1. Riziko nebezpečí však vzrůstá jak s nesprávnou manipulací, tak s obsluhou nezkušeného a nekvalifikovaného uživatele. V takovém případě jsou rizikem také možné odrazy záření v důsledku reflexního povrchu materiálu. Nebezpečí také vzrůstá při užití optických pomůcek a při zvyšující se délce trvání ozáření. Laserová zařízení Třídy 3R by měla být užívána především v oblastech, kde je přímý pohled do svazku nepravděpodobný [25, 26, 27]

Přípustný výkon zdroje je $6 \cdot 10^{-4}$ až $4 \cdot 10^{-3}$ W.

4.6 Třída 3B

Na rozdíl od Třídy 3R jsou lasery Třídy 3B považovány za nebezpečné při pohledu do svazku, včetně nahodilých a krátkodobých ozáření.

Lasery této třídy, dosahující limitu přístupné emise, mohou způsobovat poškození kůže, ale také mohou být hrozbou pro eventuelní zapálení hořlavých materiálů. Větší pravděpodobnost vzplanutí hrozí v případě, kdy svazek vykazuje malý průměr nebo je zaostřen [25].

Bezpečné je však pro lasery 3B třídy, za běžných podmínek, sledování difúzních odrazů. Přípustný výkon zdroje těchto laserů je 0,5 W.

4.7 Třída 4

Lasery Třída 4 jsou charakterizovány velkými výkony a jsou nebezpečné nejen pro oči, ale také pro kůži. Na rozdíl od Třída 3R je u laserů Třída 4 nebezpečné i přímé ozáření a difúzní či zrcadlový odraz, což může způsobit nejen poškození zdraví, ale také vznik požárů [25, 27].

5 VYUŽITÍ LASEROVÉHO PAPRSKU

Laser od samého vzniku do dnešní doby prošel mnoha inovacemi a zdokonalovacími úpravami, které umožňují jeho využití v celé řadě odvětví. Díky dlouholetému vývoji a možnostem aplikace jsou lasery dnešní doby využívány v medicíně, astronomii, geodesii, spektrometrii, energetice, ale i výpočetní technice, armádě, v průmyslu a dalších.

5.1 Laser v medicíně

První zmínky o využití laserové techniky v medicíně jsou datovány zhruba od roku 1961, kdy při použití rubínového laseru byl poprvé testován vliv působení laseru na kožní problémy, jako jsou červené skvrny a jiné anomálie, nádory kůže nebo také využití jeho schopnosti přivařit odchlípnutou sítnici [3, 15].

Hugh Beckham v roce 1965 uvedl do praxe užití laseru při operacích očí, konkrétně duhovky. Rovněž ve stejném roce byly uvedeny poznatky o tom, že je možné laser využívat namísto chirurgického nože.

Hlavní výhodou užití laseru při operacích očí je jeho mírný invazivní účinek. To znamená, že proveditelnost operací je velice rychlá a bezbolestná a mnohé zákroky lze provést ambulantně. V dnešní době je již původní rubínový laser pro operace sítnice nahrazen kvazikontinuálním argonovým laserem a Nd – YAG laserem, který je naopak užívám především pro operace předního pouzdra čočky pacienta [15].

Výše uvedené informace hovoří především o užití laseru v oftalmologii. Pravdou však je, že laserová zařízení jsou využívána v širokém okruhu medicíny. Využití tak nachází mimo jiné i v otolaryngologii, urologii, gynekologii, ale také v neurochirurgii, dermatologii i při plastických operacích [3, 15].

5.1.1 Fofodynamická terapie

Laserová zařízení mají schopnost aplikovat daný svazek záření do konkrétního bodu, proto jsou často využívána při detekci nádorových onemocněních a také za účelem zničení rakovinotvorných buněk.

Princip detekce rozsahu rakovinných buněk spočívá v tom, že ovlivněná oblast musí být obohacena světlocitlivou látkou, která je pohlcována pouze nádorovou tkání. Ta může být aplikována buď intravenózně, intralezionálně nebo injekčně či pomocí speciálních mastí. Jakmile je tato světlocitlivá látka nádorovými buňkami pohlcena, provede se ozáření laserem o

vlnové délce, absorbovatelné pouze touto aplikovanou látkou. Výsledkem tak může být buďto fluorescence, která zobrazí tvar, velikost a přesnou polohu karcinomu nebo generování singletního kyslíku, který danou tkáň přímo ničí a redukuje [7, 16].

Výhodou této metody při aplikaci na nádorové buňky je krom ničení buněk nádorových samotných i zničení a narušení funkce cévního systému daného nádoru, bez ovlivnění okolní zdravé tkáně. Právě proto může být tato metoda léčby na rozdíl od chemoterapie a radioterapie využívána v krátkém časovém období několikrát po sobě a dle potřeby jej opakovat [7, 16].

Navzdory kladům fotodynamické terapie je její hlavní nevýhodou omezená možnost užití. Konkrétně se jedná o její omezenou schopnost proniknout do hloubky tkáně. Může totiž proniknout maximálně do hloubky 1 cm. Z tohoto důvodu je fotodynamická terapie využívána pouze pro povrchová onemocnění, případně u lokací, kde lze laserové záření přiblížit či konkrétně aplikovat prostřednictvím katétrů a endoskopů [16].

Pro tuto metodu je nejčastěji využíváno barvivových laserů buzených argonovým laserem.

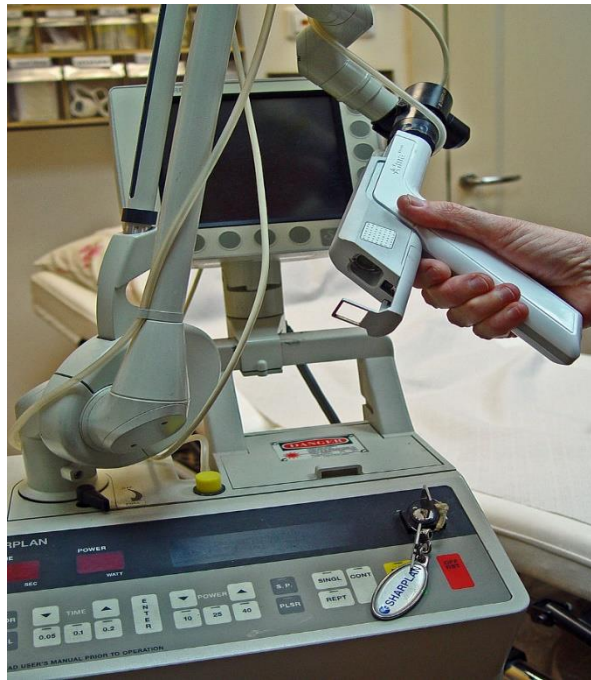
5.1.2 Dermatologie

Jak již bylo zmíněno, lasery jsou v oblasti dermatologie, speciálně z estetického hlediska velice žádané. Nejčastější využití nacházejí v oblastech odstraňování nežádoucích kožních anomálií, jako jsou červené skvrny, výrazné pigmentové skvrny, ale také za účelem odstranění výrazně rozšířených červených žilek a podobně. Své využití rovněž nachází v rámci odstraňování nežádoucího tetování, zmírnění celulitidy, jizev, proleženin, ale i odstranění známek stárnutí ve formě vrásek, či nežádoucího ochlupení. Dalším moderním využitím laserů v dermatologii je v rámci metody implantování vlasů [17].

Nicméně krom výše zmíněných funkcí mohou být laserová zařízení díky svým virostatickým účinkům užívány také k léčbě herpesu. K léčbě jsou tak využívány jak pulzní, tak kontinuální lasery o frekvenci 10 Hz. Pro lepší účinnost a efektivitu této užití metody bývají často léčebné procesy doplňovány i o laseropunkturu [17].

5.1.3 Chirurgie

Nejširší a zároveň největší uplatnění laserové technologie v rámci medicíny je oblast chirurgie. Vlastnosti laserového svazku tak umožňují bezdotykový a velice precizní řez tkáněmi s možností odstranění či vyjmutí velmi malých struktur aniž by došlo k ovlivnění okolní tkáně a zanesení případné nežádoucí infekce do rány [18].



Obrázek 12 Laserový skalpel Sharplan 40C [30]

Hlavní výhodou užití laseru je okamžité zajišťování okrajů řezu včetně okamžitého zastavování krvácivosti menších cév a miznic. Z toho plyne, že se těmito zákroky říká také „operace čistého stolu“, protože díky okamžitému zastavování cév nedochází během zákroku ke krvácení a ztrátě krve. S tím souvisí rovněž menší pooperační bolestivost a zamezení vzniku případných edémů, včetně rychlejší a úspěšnější rekonvalescence [7, 18].

Při užití laserů pro odstraňování karcinomu je díky šetrnosti laserového záření zabráněno případnému genetickému poškození, ale i vyvolání karcinogeneze, včetně roznesení nádorových buněk do okolních tkání [7, 18].

Pro chirurgické výkony může být užívána hodnota hustoty energie záření v rozmezí od 1 – 1000 J/m².

5.1.4 Léčba očí a zraku

Laser v oblasti medicíny je mezi populací znám především pro svou schopnost a pozitivní výsledky v oblasti operací zraku, ale i jiných očních vad.

Hlavní výhodou laserových operací očí je možnost provést zákrok na tomto orgánu v jeho přirozené poloze – bez případného vyjmutí či rozřezání a podobně. Operace a následná rekonvalescence je velice rychlá a málo bolestivá. Mnohé zákroky lze vykonávat ambulantně, bez případné celkové anestezie a hospitalizace [7, 17, 18].

Nejčastěji jsou lasery v oftalmologii využívány k léčbě diabetické retinopatie, která představuje nejčastější příčinu oslepnutí. K těmto operacím je využíván ve většině případů laser Nd – YAG. Další velice oblíbené a četné zákroky prováděné laserovým zařízením jsou oční vady, krátkozrakost, dalekozrakost a odchyly zakřivení oční rohovky. Veškeré tyto zákroky mají velice pozitivní a úspěšnou odezvu [18].

5.1.5 Urologie

V urologii jsou lasery využívány především k odstraňování nežádoucích srůstů a k získání méně invazivních a jemnějších řezů. Krom těchto aplikací lze laser využít také pro opětovné zajištění průchodnosti močových cest díky odstranění či takzvaného „rozbití“ ledvinových či močových kamenů. Kameny jsou drceny rázovou vlnou, která je iniciována právě výkonovým zářením laseru. K těmto účelům jsou nejčastěji využívány lasery typu CTH – YAG a Nd – YAG s nelineárním krystalem. Naopak pro operace ledvin jsou nejčastěji využívány lasery typu CO₂ [18].

Výhodou užití laserů k zajištění nádorového onemocnění je bezproblémová destrukce rakovinotvorných buněk bez nebezpečí perforace stěn močového měchýře či dalších orgánů [7].

5.2 Laser v průmyslu

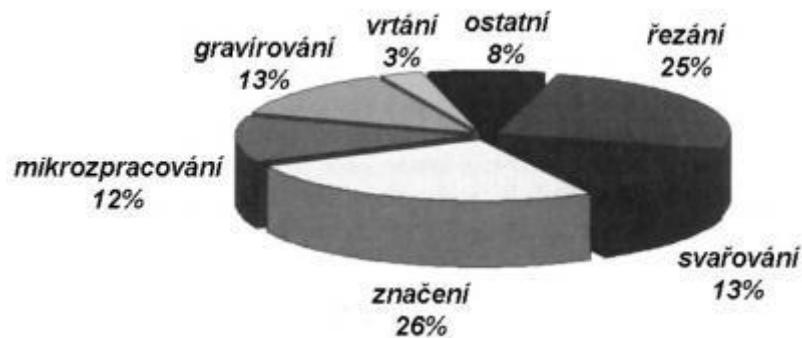
Laserová zařízení jsou využívána v průmyslu za účelem proveditelnosti celé řady úkonů. Mezi hlavní výhody užití těchto metod se řadí:

- vysoká rychlost vykonání,
- velmi úzká tepelně ovlivněná oblast,
- velká přesnost,
- čistý a tichý průběh,
- neopotřebování stroje prací.

Naopak mezi hlavní nevýhody laserových zařízení jsou vysoké pořizovací náklady nejen na přístroj samotný, ale také na nutné kvalifikace a opětovná školení obsluhujícího personálu.

Lasery v průmyslovém odvětví dnes mohou být využívány k celé řadě úkonů. Mezi ně patří:

- řezání,
- svařování,
- vrtání,
- popis a značení,
- mikropracování
- tepelné zpracování a další.



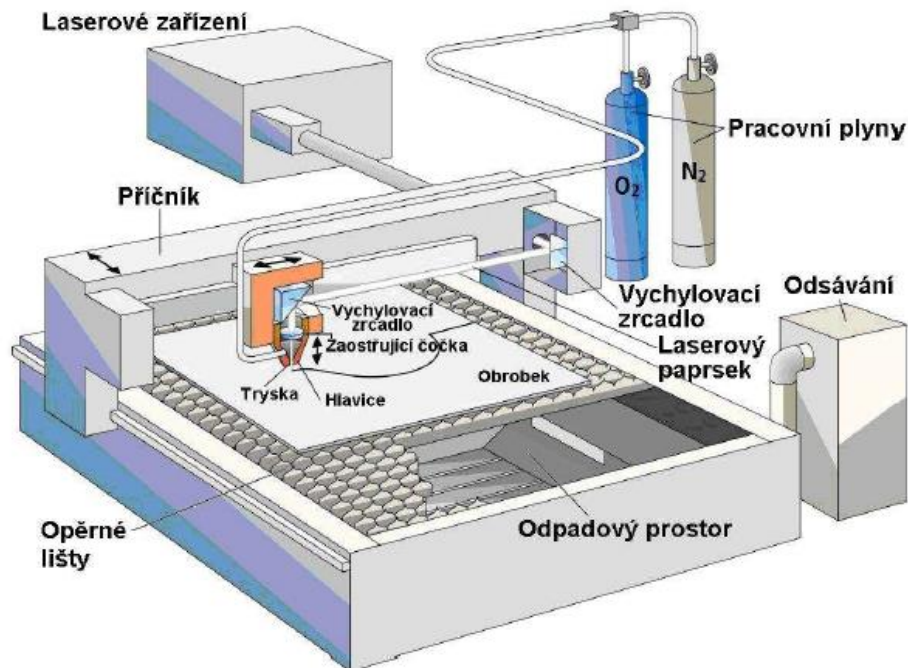
Obrázek 13 Procento rozdělení jednotlivých technologií [28].

5.2.1 Řezání pomocí laseru

Ve srovnání s běžnými metodami řezání je laserová technika výrazně výhodnější. Jedná se o proces bezkontaktního oddělování materiálů o různé tloušťce a vlastnostech. Jeho proces je velice rychlý, přesný a výsledný efekt je mnohem dokonalejší a mnohdy i levnější [3].

K řezání jsou nejčastěji využívány CO₂ lasery, kterými je možné řezat kovové materiály (konstrukční oceli) až do tloušťky dvou centimetrů. Za účelem získání ještě více přesnějších řezů jsou využívány také lasery Nd – YAG o výkonu od 100 W až do 1000 W [3].

Užití však není zaměřeno pouze na kovové materiály, ale také na materiály nekovové. Využití tak může být krom řezání například hliníku, mědi, oceli také pro práci se dřevem, plasty, sklem či keramikou. Pro řezání kovů, konkrétně titanu, nerezové oceli či oceli s nízkým obsahem uhlíku, jsou nejčastěji přiváděny reaktivní plyny, například kyslík, tím dojde k exotermické reakci, která podpoří rychlost procesu. Naopak pro řezání keramiky, plastů či dřeva je přiváděn plyn inertní, kterým je odstraňován roztavený a odpařený materiál. Schéma řezného laserového zařízení je uvedeno na obrázku číslo 14 [3, 11, 19].



Obrázek 14 Schéma řezacího laserového zařízení [11].

Laser je možné využívat pro řezání materiálů o tloušťce od 0,5 mm až do 25 mm.

Během řezání na materiál působí teplo pouze lokálně, a proto nedochází k významnému ovlivňování okolních míst obrobku a ke vzniku natavení materiálu na řezné hraně. Řezy jsou hladké a bez otřepů. Snadnost přenastavení řezných zařízení umožňuje výrobu mnoha typů a variant dílů, jak v malé, tak sériové výrobě. Vzhledem ke svým možnostem je řezání laserem užíváno také pro lékařské potřeby, konkrétně pro výrobu stentů, nebo například pro řezání chemicky kalených skel [3, 19].

5.2.2 Vrtání pomocí laseru

Proces laserového vrtání spočívá na principu odpařování daného materiálu působením laserového svazku na konkrétní oblast.

Pro zmiňované odpařování materiálu je nutné dodání tepla zfokusovaným laserovým paprskem o vysoké hustotě výkonu. Při jeho dopadu na povrch materiálu dochází k vytvoření takzvaného kráteru, který se krátkými mikroexplozemi dokáže dále prohlubovat. Vrtání lze provádět jak na kovových materiálech, za užití Nd – YAG laserů, tak u jiných nekovových materiálů, například u keramiky, kdy jsou využívány lasery excimerové [3, 15].

První laserová vrtání byla prováděna pevnolátkovými rubínovými lasery, které byly později vyměněny za pevnolátkové iontové lasery jako je Nd – YAG laser či laser opatřený

neodymovým sklem. U laserového vrtání je využívána mnohem větší intenzita záření optického paprsku, než je nutné u jiných aplikací. Délka impulsů je tak menší než 2 ms [3, 15].

Užitím této metody jsou získávány velice přesné otvory i v místech, kde by byly jiné způsoby vrtání zcela nemožné. Lze tak získat otvory o průměru od 10 μm až po 100 μm . Hlavními výhodami zmiňovaného procesu je jeho rychlost, rychlé ochlazení, flexibilita a opakovatelnost, spolehlivost a přesnost [3].



Obrázek 15 Pohled do pracovního prostoru během vrtání laserem [31].

5.2.3 Svařování pomocí laseru

V rámci získání nerozebíratelných spojů u kovových materiálů je vhodné užití laserového svařování.

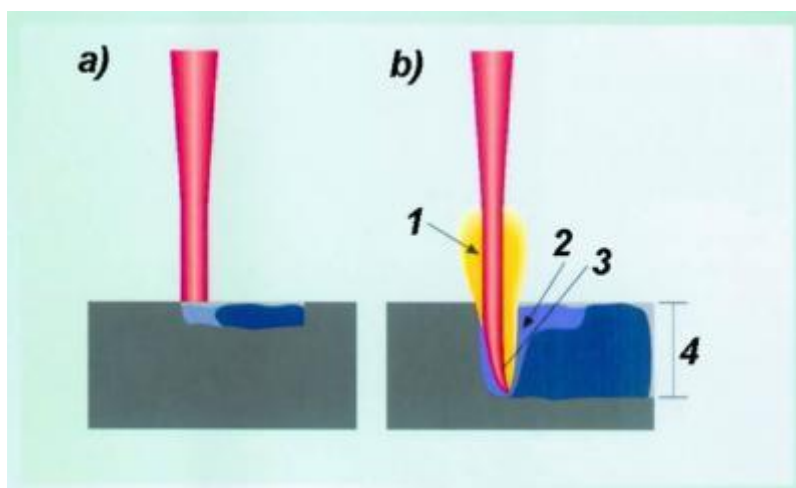
Mezi nejvýznamnější a nejvíce oceňované výhody patří minimální deformace spojovaných dílců, vysoká rychlost procesu a proveditelnost s minimálním ovlivněním okolního prostředí. Respektive lze říci, že za užití laserového svařování je tepelně ovlivněná zóna velice malá. Hlavním cílem zajišťujícím celistvost svařence a získání požadovaných fyzikálních mechanických vlastností je snaha o nejužší a zároveň nejhlubší svar [3, 4].

Vzhledem ke snadnosti a rychlosti užití jsou laserová svařování často robotizována a automatizována. Samotný proces svařování není nijak zvlášť finančně náročný. Nejdražší na celém procesu je pořizovací investice a náklady spojené s instalací celého zařízení a jeho prvotního rozběhu [3, 4].

Ke svařování jsou nejčastěji využívány YAG lasery a CO₂ lasery. Volba laseru je závislá na požadovaném finálním efektu výrobku. Pro svary menších rozměrů, či pro docílení extrémně přesného svařence jsou užívány pulzní YAG lasery. Další nejužívanější variantou svařování jsou CO₂ lasery a diodové lasery [3, 4].

Svařování může být prováděno především dvěma způsoby a to:

- a) vedením tepla
- b) hloubkově



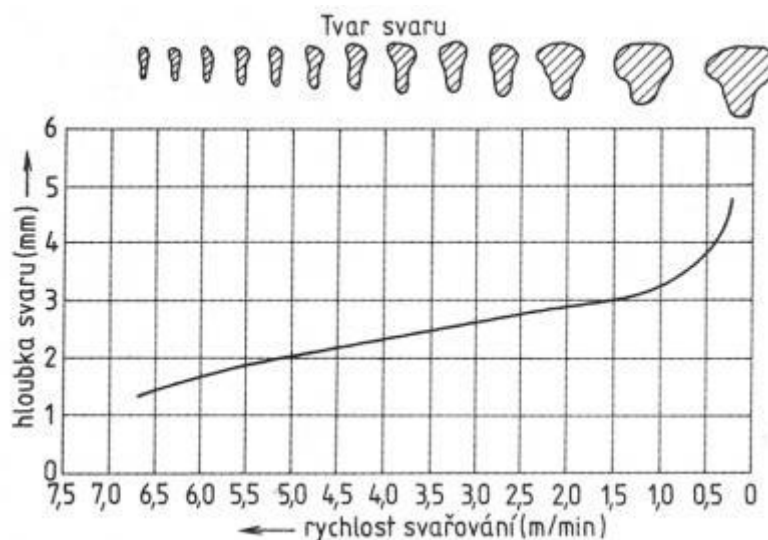
Obrázek 16 Způsoby svařování materiálu

(1-plazma, 2-tavenina, 3-„klíčová dírka“, 4-penetrační hloubka) [31].

Pulzní svařování využívající nízkou opakovací frekvenci umožňují buďto částečné nebo úplné tuhnutí laserové lázně mezi jednotlivými pulzy. Tím je pak svarová housenka vytvořena z mnoha překrývajících se a za sebou jdoucích bodů. Tato metoda je užívána především u materiálů menších tloušťek, malosériové výroby a v místech složité proveditelnosti svarů jinými metodami [4].

Druhou metodou vytváření svarů je užití vysoké hustoty výkonu, která využívá kapiláru, která je naplněna ionizovanými výpary o vysoké teplotě. Funkce kapiláry spočívá v přenášení energie přímo dovnitř materiálu, podél svarových ploch. Samotná kapilára je tak tvořena roztaveným kovovým materiálem. V důsledku posuvu laserového svazku ve směru svařování dojde vlivem povrchového napětí roztaveného kovu k opětovnému spojení dvou materiálů. Tímto způsobem jsou svařovány především tupé svary, které ke spojení nepotřebují přidání svarového materiálu. Může tak vznikat spoj s plným nebo pouze částečným průvarem [3, 4].

Hlavními výhodami svařování je opět především rychlost a přesnost procesu. Při špatně zvolených podmínkách svařování pro daný materiál může docházet k nežádoucím vadám. Mezi nejhorší možné vady patří trhliny, nadměrné množství pórů a jejich nerovnoměrné rozložení v materiálu, nedokonalé provaření, vzniklé prolákliny a podobně.



Obrázek 17 Závislost hloubky svaru na rychlosti svařování - výkon laseru 1500 W [31].

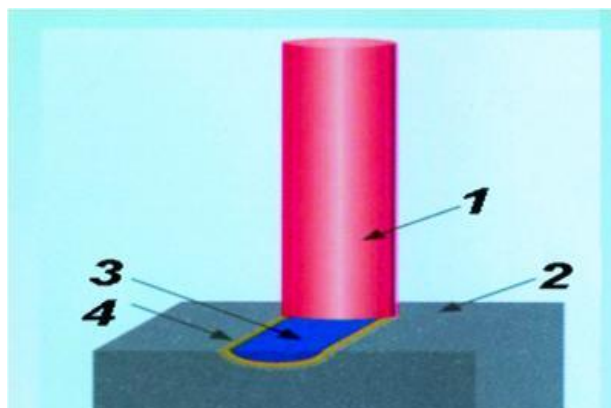
5.2.4 Kalení pomocí laseru

Kalení pomocí laserového paprsku představuje ve srovnání s klasickými metodami pouze intenzivní zahřívání a ovlivňování pouze konkrétních lokací povrchových vrstev materiálu a dostává tak teplotu pod hodnotu jeho teploty tavení. Ovlivňováním pouze povrchových vrstev, bez ovlivňování okolního materiálu, může být tepelné zpracování provedeno až do hloubky 2,5 mm [3, 15, 20].

Nejvhodnějšími zástupci laserů k vykonání kalení jsou vláknové lasery, vysoce výkonné diodové lasery, CO₂ lasery a Nd – YAG lasery.

Hlavními výhodami laserového kalení je ovlivnění pouze požadované povrchové oblasti materiálu, minimální deformace, žádná či pouze minimální nutnost finálního opracování, ekologičnost procesu a nulový výskyt povrchových trhlin a další. Kalení lze provést také v nesnadno přístupných místech, například kalení drážky v otvoru a jiných náročných oblastech [3, 20].

Princip laserového kalení spočívá v rychlém ohřevu povrchu materiálu na požadovanou teplotu, výdrži na této teplotě a následném velice rychlém ochlazení. Celý princip kalení je závislý na výkonu laserového paprsku a jeho režimu v závislosti na ovlivněném materiálu. U materiálu, který je laserově kalený je tedy podstatná jeho schopnost pohltit laserové záření, včetně jeho mikrostruktury. V závislosti změny teploty při procesu kalení dochází u ocelí k austenitizaci, kdy v rámci následného ochlazování dochází ke vzniku žádané tvrdé martenzitické struktury. Rozdíl od běžného kalení je při užití laserového procesu v tom, že ochlazování materiálu není prováděno za užití chladících médií, ale k ochlazování a odvodu tepla dochází zbytkovým materiálem obrobku.[3, 15, 20].



Obrázek 18 Princip kalení laserem

(1-paprsek laseru, 2-neovlivněný povrch, 3-zakalený materiál, 4-tepelně ovlivněná oblast) [31].

Kalení je prováděno pouze u kovových materiálů s obsahem uhlíku nad 0,22 %, kdy rychlost vzrůstu teploty a samotná teplota ohřevu je korigovatelná a sledovatelná termokamerou či pyrometrem. Právě proto je tato metoda využívána pro výrobu pístních kroužků, ložiskových pouzder, lopatek turbín a ozubených kol, ale i u střížných a ohýbacích nástrojů a licích forem složitých tvarů [3, 15, 20].

5.2.5 3D obrábění pomocí laseru

Technologie 3D obrábění laserem představuje dosažení nejvyšší preciznosti výrobního procesu. Touto metodou je možné vyhotovit různé varianty nejsložitějších tvarů, či výrobků s maximálně precizními nejmenšími detaily jakéhokoli materiálu. Vzhledem k dosažitelné jemnosti a detailů je 3D obrábění laserem využíváno především při výrobě medicínského náčiní, pomůcek i techniky. Dále k výrobě šperků, ale i reklamních předmětů či komponentů pro modelářství. 3D obrábění laserem je poměrně novou, avšak velice žádanou metodou. Zájem o tuto technologii výrazně vzrostl a ukotvil své místo zhruba od roku 2005 [21].

Tato laserová technologie umožňuje proveditelnost vyhotovení detailů na mikroskopické úrovni u celé řady materiálů bez ohledu na jeho tvrdost i houževnatost. Využívá se proto pro aplikace s ocelí, mědi, slitin hliníku, tvrdokovu, grafitu, molybdenu, tantalu, keramiky, PKD a CBN [21].

Princip technologie 3D obrábění spočívá v postupném odebírání určitého množství hmoty pomocí laserového paprsku. Množství odebraného materiálu a hloubka v místě působení laseru je kontrolována elektronicky pomocí měřící sondy a CCD kamery. Obrábění je možné provádět až do hloubky 2 mm [21].

5.2.6 Mikroobrábění pomocí laseru

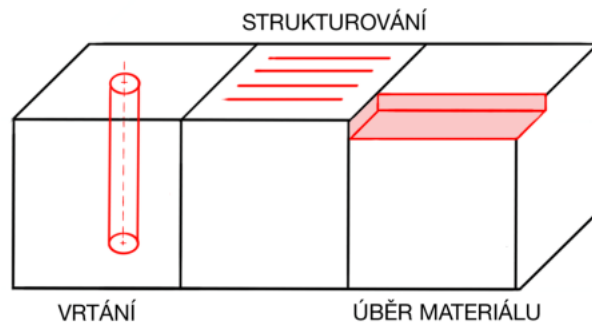
Řada technologií užívaných v dřívější době dnes v důsledku potřeby zvýšit kvalitu zpracování za současného snížení doby výroby již není dostačující. Právě za účelem získání a provedení úpravy i velice malých rozměrů bylo nutné zavedení technologie mikroobrábění pomocí laseru, které způsobuje úbytek materiálu tepelným účinkem.

Princip metody mikroobrábění laserovým paprskem spočívá v odebírání materiálu právě v místě dopadu laserového paprsku. Paprsek o vysoké intenzitě záření působí na konkrétní a to velmi malou oblast, která je působením paprsku velmi rychle ohřáta a daný materiál je v tomto místě odpařen. Tím nedochází k rozsáhlému tepelnému ovlivňování okolního materiálu. Mikroobrábění proto může být využíváno jako doplňující technologický

proces normálního obrábění materiálu, ale i jako samostatná technologie. U této metody může být nastaven pulsní režim, frekvence, proud, šířka impulsu i typ plynů [22].

Technika mikroobrábění může být rozdělena na:

- vrtání
- strukturování
- úběr materiálu



Obrázek 19 Způsoby mikroobrábění [22].

V případě strukturování materiálu pomocí mikroobrábění dochází na povrchu materiálu k vytváření pravidelných geometrických znaků do hloubky několika milimetrů. Nejčastěji se tato metoda využívá k výrobě solárních panelů a pro výrobu článku se zlepšenými kluznými vlastnostmi. Úbytek materiálu spočívá ve zmiňovaném natavení materiálu působením paprsku, kdy dochází k jeho odpařování a vzniku úbytku neboli otvoru. Proces vrtání je v tomto případě prováděn na obdobném procesu využívajícím odpařování, kdy je materiál nataven, odpařován a tím se může působící paprsek dostávat stále do větší hloubky materiálu a ne jen do omezené šířky povrchové vrstvy.

Výhodou mikroobrábění je možnost užití i u materiálu citlivých na zvýšené teplo, které by mohlo způsobit transformaci struktury povrchové vrstvy materiálu. Přenos tepla do okolí je proto minimální [22].

5.2.7 Značení pomocí laseru

Podobného výsledku jako při mikroobrábění laserem je dosahováno metodou značení a popisování laserovou metodou. Při užití této technologie dochází k natavení a následnému odpařování materiálu v ovlivněném místě nebo ke změně zbarvení daného místa. Výsledkem je odolná a trvalá stopa na povrchu materiálu, která je mechanicky odolná [23].

Užitá metoda lze aplikovat na velkou škálu zakřivených, ale i rovinných materiálů. Značení laserem se provádí na různě tvrdých materiálech a to od oceli, hliníku, slitin hliníku, titanu, až po sklo, dřevo, papír a jiné.

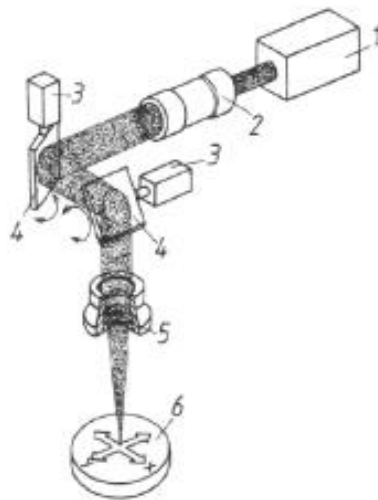
Pro značení je využíváno nejčastěji CO₂ laserů, Nd – YAG lasery, excimerové a vláknové lasery.

Značení a popisování výrobků může být provedeno dvěma způsoby:

- vychylováním paprsku laseru
- popisováním přes masku

Značení díky vychylování paprsku laseru spočívá na vychýlení paprsku dvěma vzájemně kolmými zrcadly. Mezi hlavní výhody tohoto způsobu patří snadná možnost změny psaného textu a vysoká operativnost. Popisování může být prováděno jak CO₂ lasery o výstupním výkonu 8 W až 20 W, tak i Nd – YAG laserem o výstupním výkonu 50 W až 100 W.

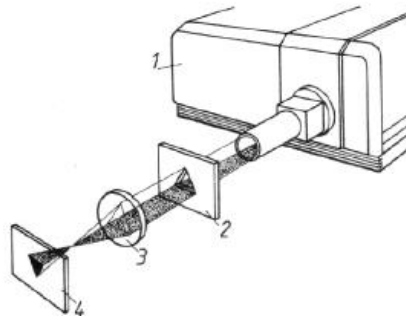
Schéma vychylování paprsku pro popisování materiálu je znázorněno na obrázku č. 20 [23].



Obrázek 20 Schéma principu popisování materiálu pomocí vychylování paprsku (1-laser, 2-optická cesta, 3-pracovní hlava, 4-vychylovací zrcátka, 5-objektiv, 6-obrobek) [23].

Naopak proces popisování materiálu přes masku je založen na osvětlení masky s předem vyřezaným textem, který je působením laserového paprsku „vypálen“ do materiálu. V důsledku vystavení masky laserovým paprskům, musí být její výroba provedena z odolných materiálů. Nejčastěji je tak k výrobě masek využívána mosaz či bronz. Laserové paprsky jsou v tomto případě produkovány buď Nd – YAG lasery nebo CO₂ a excimerovými lasery.

Nevýhodou této metody je snížená kvalita výsledného produktu a opětovná výměna masky při požadované změně textu. Znázornění schématu metody popisování přes masku je na obrázku č. 21 [4, 23].



Obrázek 21 Popisování materiálu pomocí masky

(1–laser, 2–maska, 3–objektiv pro zaostření paprsku, 4–obrobek) [23].

5.2.8 Laserové gravírování

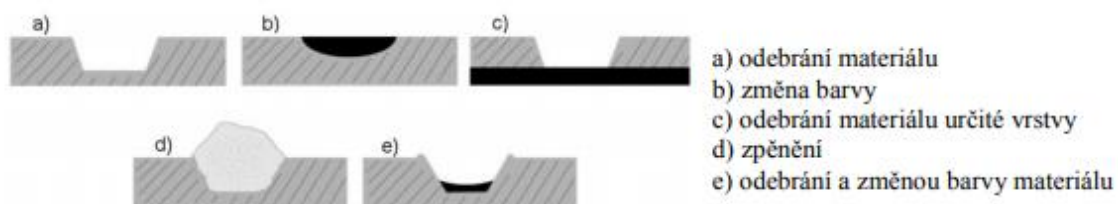
Gravírování pomocí laseru je stejně jako značení laserem využíváno ke značení a popisování materiálů mnohdy pouze z dekorativního důvodu. Značení se vykazuje odolností proti poškození a dlouhou trvanlivostí. Mnohé materiály lze gravírovat mnoha dalšími způsoby a to od užití dlát, razníků, vtlačování hrotů až po užití frézek a podobně [23, 24].

Laserové gravírování však lze použít pro různé materiály. Možnost užití závisí pouze na výběru vhodného typu laseru vzhledem k absorpci laserového záření daným materiálem. Pro nekovové materiály jako je plast, sklo, dřevo a papír je využíváno především CO₂ laserů, kdežto u kovů je vhodné užití Nd – YAG laseru [23, 24].

Výhodou gravírování pomocí laseru je její rychlost i schopnost případného řezání tenkých fólií různých materiálů včetně papíru. Naopak nevýhodou je omezený rozsah užití této metody. Gravírování a značení lze provádět několika způsoby a to:

- odebíráním materiálu,
- změnou barvy,
- odebíráním materiálu předem dané vrstvy,
- zpěněním,
- odebráním a změnou barvy.

Znázornění zmíněných způsobů gravírování je uvedeno na obrázku č. 22.



Obrázek 22 Znárodnění metod gravírování a značení materiálu za užití laseru [24].

5.3 Laser v ostatních odvětvích

Laser je využíván k celé řadě úkonů. Lze je užívat k takzvanému rýhování, ale také ke změně struktury materiálu. Změna materiálu způsobená místním ohřevem je označována žiháním. Její využití je především v oblastech kovů, konkrétně pro rekrytalizaci krystalické (kubické) mřížky materiálu. Touto změnou následně dochází i ke změně mechanických vlastností [1, 3, 15].

Všechny metody a technologie využívající laserové záření jsou ve své podstatě založeny na odstranění velmi tenké vrstvy materiálu, respektive takzvaným vypařením, ke kterému dochází právě díky působení intenzivního světelného paprsku na daný povrch.

Může být proto využíván také k opravě polovodičových pamětí, kdy je původní poškozený obvod odpojen a místo něj jsou připojeny obvody či jednotlivé díly nové. Dalším možným ovlivněním může být i obohacení substrátu o příměs, kdy působením laseru je na povrchu substrátu rozložen plyn obohacený o dopující směs, které s uvolněným dopadajícím zářením dále difundují (pronikají) do materiálu [1, 3, 15].

Využití nachází laserová zařízení také v litografii, ale i při odstraňování nečistot z povrchů materiálů.

5.3.1 Užití v oblasti geodézie i ekologie

Velmi brzy po vynalezení laseru se začali laserové zařízení užívat také ve zmiňované geodézii, geofyzice i ekologii. Využití tak nachází jako součást radarů, které vysílají záření. Jejich princip spočívá v měření vzdáleností k požadovaným objektům pomocí záření, které je odráženo zpět do směru, ze kterého bylo záření vysláno. Taková zařízení jsou umístěna především na pozemní objekty, ale i na družice a povrch Měsíce. Hlavní princip měření vzdálenosti mezi původním bodem a měřeným místem je založen na měření času, který uběhne mezi vysláním impulsu záření od měřeného objektu. Laserové radary mohou spolehlivě pracovat až na vzdálenost do 20 kilometrů, pokud však jde o měření pozemních objektů, lodí,

letadel nebo také oblačnosti. Větších měřitelných vzdáleností lze docílit pomocí odražečů. Nejvzdálenějším místem měřitelným laserovou technikou je proto Měsíc, který má na svém povrchu umístěny právě tyto odražeče záření. Vzdálenost dosahu je v tomto případě zhruba 380 000 km [1, 3, 15].



Obrázek 23 Koutový odražeč na měsíci instalovaný posádkou Apolla 14 [33].

Určení správné vzdálenosti měřeného objektu však závisí na mnoha faktorech. Konkrétně se jedná o preciznost a přesnost v měření časového intervalu záření od původního, k měřitelnému objektu. Další důležitou roli sehrává geometrie měřeného objektu, konstrukce a lokace odražečů, matematických modelech, ale i schopnosti šíření záření atmosférou. V dnešní době tak astronomové mohou díky laserům studovat dynamiku pohybu Měsíce a dalších umělých družic Země [3, 15].

Laserové radary však nejsou používány pouze k měření vzdáleností, ale také ke zhodnocení míry znečištění ovzduší či vody. Princip této metody spočívá v rozptylování molekul v rámci průchodu atmosférou a zkoumání amplitudy a času jejich případného zpětného směru, čímž lze následně určit vzdálenost rozptylujícího útvaru. Na obdobném principu je také měřena například míra oblačnosti, její hranice, ale také turbulence a hodnocení výskytu různých látek v ovzduší [1, 3, 15].

Všechny výše zmíněné informace jsou velice důležité vzhledem k předpovědi například zemětřesení i jiných katastrof. Užitím laseru v radarech byly získány informace o tvaru zemského geoidu s přesností až na 10 cm. V geofyzice tak hraje hlavní roli získaná informace o rychlosti pohybu kontinentů a seismografické činnosti. Pro takové účely jsou užívány především pevnolátkové rubínové Nd – YAG lasery.

5.3.2 Užití laserů v holografii

V holografii jsou lasery využívány například pro převedení 3D obrazů do filmové podoby. Princip této metody spočívá v interferenci obou koherentních svazků, přičemž jeden dopadá na zrcadlo a až poté na film. Druhý dopadá naopak na předmět a až potom na film [1].

Výsledkem je získání shluku interferenčních proužků, které pod určitým natočením na světlo lze přečíst a výsledkem je právě trojrozměrný obraz [1, 3].

5.3.3 Separace izotopů

Lasery jsou využívány rovněž k separaci izotopů, která má největší opodstatnění v oblastech jaderné energetiky. V takovém případě se jedná především o separaci izotopů vodíku, lithia, uranu či izotopů stopových prvků.

Princip separace izotopů spočívá v převedení izotopů monochromatického laserového zářícího zdroje do vzbuzeného stavu, přičemž atomy ostatních izotopů zůstanou v základním stavu. Vzbuze­né atomy se pak ionizují buďto srážkou s další částicí, opticky nebo elektrickým polem [3, 4].

Nevýhodou této metody je separace izotopů pouze v plynné fázi. Výhodou vzhledem k jiným metodám je naopak nutnost velmi nízké energie k separaci jednoho atomu [3, 15].

6 POROVNÁNÍ KONVENČNÍCH METOD S TECHNOLOGIÍ LASERU

Při hodnocení konvenčních a nekonvenčních metod je nutné brát zřetel na celou škálu faktorů ovlivňujících volbu užití metody. Konkrétně je nutné hodnotit například finanční stránku, efektivitu využití, kvalitu finálních výrobků a případné další úkony spojené s dopracováním dílů.

6.1 Laserová technologie

Technologie využívající lasery je velmi oblíbenou nejen díky možnostem užití u široké škály materiálů, jako jsou kovy, plasty, keramika, dřevo, papír a sklo. Možnost užití a efektivita laserů však vždy závisí na vlastnostech daného materiálu. Konkrétně se tedy hodnotí chemické složení, reakce s laserovými paprsky, ale také schopnost absorpce a prostupnost materiálem. Procesy fungují bezdotykově [28].

Negativem laserových zařízení je pořizovací finanční náročnost a také vyšší náklady na údržbu a provoz. Právě proto musí být při výběru laseru zhodnoceno, zda bude jeho využití efektivní. Důležitá je také správná volba pracovního plynu vůči obráběnému materiálu, aby se zabránilo případným negativním reakcím plynu s materiálem [5,19, 28].

Mezi výhody laserů je automatizace procesů, získání velmi kvalitních výsledků obráběných ploch bez nutnosti dalšího opracování či jiných finálních úprav. S tím souvisí rovněž snížení nákladů jak na případné dokončovací operace, tak i na snížení nutné pracovní síly a času.

6.2 Konvenční obrábění

Na rozdíl od užití laserů, pracují konvenční metody obrábění při kontaktu nástroje a obráběcího materiálu. Mezi konvenční metody obrábění proto patří řezání, frézování, soustružení, vrtání a jiné. Kvalita výrobků závisí na výkonnosti stroje, volbě procesu, obráběném materiálu a podmínkách obrábění [5].

Hlavním rozdílem a zároveň nevýhodou ve srovnání s užitím laseru pro stejnou funkci je nutné provedení několika kroků. Materiál musí být rozdělen, následně obroben nahrubo s nutností začlenění několika dokončovacích kroků.

Dalším rozdílem od laserových zařízení je jejich lepší finanční dostupnost a menší finanční náročnost provozu a údržby strojů. Mnohé CNC zařízení dnes lze již do určité míry také automatizovat a docílit tak kratších výrobních časů [28].

6.3 Hlavní rozdíly konvenčních a nekonvenčních metod obrábění

Jsou-li laserová zařízení plně využita, je počáteční investice v průběhu výroby navracena v rámci výdělků zpět do společnosti.

Na rozdíl od konvenčních metod obrábění je u laserových zařízení možné rychle reagovat na změny a nové požadavky zákazníků. To znamená relativně snadnou úpravu procesu k získání nových i tvarově složitějších výrobků bez nutnosti dalších investic. Tato možnost je však u konvenčních metod značně omezena a změna tvarů výrobků by mohla být pro firmu finančně náročná [5, 28].

Jak již bylo řečeno, u laserových zařízení jsou v rámci plného využití původní pořizovací negativa kompenzována. Taková investice a využití však má smysl při velkosériové výrobě v souvislosti se zvolenými materiály a požadovanou úsporou času a pracovních sil. Naopak pořizovací náklady konvenčních strojů jsou daleko nižší, náklady na provoz jsou také nižší, obráběcí časy mohou být vyšší, ale při nižší výrobě podniku mohou být konvenční metody i tak výhodnější [5, 19].

Právě díky tomuto přehledu nelze zcela určit, zda je výhodnější užití konvenčních nebo nekonvenčních metod. Hlavní podmínkou při výběru vhodné technologie je proto nutnost znát potenciál využití, výrobní možnosti podniku včetně zhodnocení užitých materiálů [19, 28].

6.4 Výhody a nevýhody laserových metod

Jako každá technologie, tak i laserová technologie má své výhody a nevýhody. V dalších podkapitolách si je přiblížíme pro každou technologii.

6.4.1 Metoda řezání [33, 34]

Výhody:

- Bezdotyková metoda, nejsou vnášený vnější síly (řezná síla)
- Vysoká řezná rychlost (10 m/min u tenkých materiálů)
- Není potřeba měnit nástroj
- Vysoká přesnost řezaných dílu u slabých a středních tloušťek materiálu ($\pm 0,05$ mm)
- Řezání malých otvorů, úzkých pásků a tvarů s ostrými úhly
- Velmi malé přivedené teplo, malé téměř žádné deformace řezaného kusu
- Malá šířka řezné spáry (0,2 – 0,4 mm)
- Není potřeba dokončovacích operací, obrobené plocha může být svařována bez následného broušení
- Výborné mechanické vlastnosti obrobených ploch
- Nerozhoduje pevnost materiálu
- Lze řezat téměř všechny technické materiály

Nevýhody:

- Vysoké pořizovací a provozní náklady
- Lze řezat materiál pouze do určité tloušťky: konstrukční ocel do 25 mm, vysokolegovaná ocel do 15 mm, hliník do 10 mm
- Energetická náročnost
- Nelze řezat materiály s lesklým povrchem, kvůli odrazu paprsku
- Vysoké nároky na přesnost nastavení ohniskové vzdálenosti paprsku od povrchu obrobku
- Při řezání plastů brát zřetel na nebezpečné výpary
- Menší účinnost (CO₂ – laser max. 10 %)

Výše jsou uvedeny výhody a nevýhody řezání pomocí laseru v porovnání s konvenčními technologiemi jako jsou rámové pily, kotoučové pily nebo pásové pily.

V porovnání s ostatními nekonvenčními technologiemi jako jsou například řezání pomocí vodního paprsku je laser tišší a není potřeba bezpečnostních pomůcek k ochraně sluchu. Výhodou této technologie oproti laseru je možnost řezat mnohem silnější materiály až 300 mm, paprsek vody je studený (nulová tepelně ovlivněná oblast) s tím odpadá riziko nebezpečných par, které vznikají při řezání laserem. Další nekonvenční technologie, která se využívá, je elektroerozivní metoda. Rychlost řezání je nižší než oproti laseru ale je přesnější. Lze řezat materiály až do tloušťky 600 mm. Nevýhodou této metody vůči laseru je, že lze řezat pouze elektricky vodivé materiály [46, 47].

6.4.2 Metoda vrtání [35, 36, 37, 38]

Výhody:

- Bezdotyková metoda, není potřeba měnit nástroj
- Vrtání děr s velkým poměrem hloubky k šířce (60:1)
- Možnost vrtání velmi malých otvorů s průměrem 10 μm
- Vysoká přesnost vrtaných děr v kombinaci s opakovatelností
- Lze vrtat téměř všechny technické materiály
- Malé tepelné ovlivnění materiálu
- Variabilita vrtaných otvorů
- Rychlost vrtání děr
- Menší nároky na údržbu než u mechanického vrtání
- Možnost vrtání na těžko přístupných místech

Nevýhody:

- Vysoký pořizovací náklady
- Energetická náročnost
- Malá účinnost 5-15 %
- U vrtání děr s velkým poměrem hloubky k šířce může docházet ke zúžení díry

Výše jsou uvedeny výhody a nevýhody vrtání pomocí laseru v porovnání s mechanickým vrtáním otvorů.

Vrtání děr elektroerozivní metodou v porovnání s laserem je pomalejší, vykazuje však vyšší kvalitu děr. Technologie je omezena pouze na vodivé materiály. Lze vrtat díry s větším poměrem hloubky k šířce až 120:1 [48].

6.4.3 Metoda svařování [39,40,41]

Výhody:

- Vysoká kvalita svaru
- Vysoká rychlost a přesnost procesu
- Tišší provoz než u konvenčních metod
- Malá tepelně ovlivněná oblast, malé deformace a malé vnitřní zbytkové pnutí
- Snadná automatizace procesu
- Lze svařovat bez přídavného materiálu
- Efektivně lze svařovat materiály od několika mikrometrů až po 12 mm
- Pomocí laseru lze svařovat celou řadu kovů (uhlíkovou ocel, vysokopevnostní ocel, nerezovou ocel, titan, hliník, a drahé kovy)
- Na rozdíl od konvenčních metod svařování není potřeba manuálně zkušených svářečů
- Laserový paprsek může lokálně svařovat i na místech těžko dostupných
- Nedochozí k žádnému znečišťování svaru materiálem elektrod

Nevýhody:

- Vysoké pořizovací náklady
- U velkých tloušťkách materiálu může dojít k poškození svarových ploch
- Malá účinnost 5-10 %
- Špatná svařitelnost materiálů s vysokou odrazivostí

Výše jsou uvedeny výhody a nevýhody svařování pomocí paprsku laseru v porovnání s konvenčními technologiemi svařování jako jsou ruční obloukové svařování obalenou elektrodou, MIG/MAG, TIG.

V porovnání s metodou svařování pomocí elektronového paprsku je vstupní investice vyšší než u laseru. Technologie je vhodnější pro svařování materiálu s vysokou tepelnou vodivostí jako je měď, kde lze pomocí laseru docílit svaru bez vad s hloubkou průvaru pouze 5 mm ale u elektronového paprsku to je až 15 mm.

6.4.4 Metoda kalení [42,43]

Výhody:

- Proces je prováděn bez chladicích medií
- Vyšší tvrdost zakalené vrstvy až o 100 HV než u jiných metod
- Ekologičnost procesu
- Energetická náročnost je 10x nižší než při užití indukce
- Ovlivňování pouze požadované povrchové oblasti
- Minimální deformace součásti
- Malá tepelně ovlivněná oblast
- Vyšší životnost součásti než při objemovém kalení
- Rychlost procesu i rychlejší použitelnost součásti pro následné operace
- Hospodárnější provoz
- Potřeba následného opracování je minimální nebo naprosto odpadá

Nevýhody:

- Musí být zajištěn volný přístup paprsku laseru na kalenou plochu součásti
- Vysoké pořizovací náklady
- Limitovaná hloubka prokalení

Výše jsou uvedeny výhody a nevýhody kalení pomocí paprsku laseru v porovnání s konvenčními způsoby kalení jakou jsou povrchové kalení plamenem nebo indukční kalení.

6.4.5 Metoda značení [44]

Výhody:

- Vysoká rychlost značení
- Přesné a detailní značení
- Laserové značení je trvalé a odolné vůči poškození
- Lze užít na velkou škálu materiálů (kovy, plasty, sklo, keramika a silikon)
- Hospodárnější než ostatní metody, odpadají náklady na spotřební materiál (inkoust, tonery, etikety)
- Lze popisovat nerovné povrchy

Nevýhody:

- Vysoké pořizovací náklady
- U metody popisování přes masku je při změně textu potřeba vyměnit masku

Výše jsou uvedeny výhody a nevýhody značení pomocí paprsku laseru v porovnání s konvenčními způsoby jako jsou průmyslové popisovače, razidla nebo gravírovací pera.

ZÁVĚR

Laserová zařízení mají od vzniku uplatnění v celé řadě procesů a odvětví. Mezi nejvýznamnější a nejznámější oblasti využití patří geodézie, holografie, medicína a průmysl.

Vzhledem k rozdílnosti potřebných vlastností odpovídajících oblastem využití, jsou laserová zařízení rozdělena do několika skupin. Může se tak jednat o lasery pevnolátkové, kapalinové, plynové a polovodičové, které se dále mohou lišit dle výkonu a vlnových délek záření.

Vzhledem k působení paprsku záření mohou tak být lasery za určitých podmínek více či méně nebezpečné.

Cílem teoretické oblasti mé bakalářské práce proto bylo přiblížení všeobecné problematiky laserových zařízení s cílem objasnění jednotlivých skupin dle přítomného aktivního prostředí. V rámci práce byly také popsány jednotlivé třídy bezpečnosti a možnosti užití laserů jak v průmyslové výrobě tak medicíně. Práce byla blíže zaměřena na využití laserů v průmyslovém odvětví, respektive pro objasnění užití při obrábění. Blíže tak byly charakterizovány procesy využívající laser ke svařování, řezání, vrtání, ale také k tepelnému zpracování, mikroobrábění či značení. Krom starších zařízení byly v rámci práce uvedeny také novější druhy, jako jsou slab lasery, innoslab lasery, kotoučové a vláknové lasery. V poslední kapitole byly srovnány konvenční metody obrábění s metodou obrábění pomocí laseru a popsány její výhody a nevýhody.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 153 s. ISBN 80-214-2219-X.
- [2] BRIMUS, J. Vliv koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály. Diplomová práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007
- [3] VÁVRA, J. Vliv změny technologických parametrů na kvalitu laserem obrobené plochy a ekonomičnost procesu obrábění PMMA. Diplomová práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007
- [4] ZEMČÍK, O. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 198 s. ISBN 80-214-2336-6
- [5] KROUPA, J. Technologie obrábění pomocí laseru. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011
- [6] SUKUP, M.: Mikroobrábění polymerních materiálů na CO2 laseru – Mechanika. Diplomová práce, Prostějov: UTB, Zlín 2006
- [7] BÚŠOVÁ, M. Charakterizace výstupních parametrů chirurgického laseru. Diplomová práce. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 2013
- [8] KOECHNER, Walter. Solid-state laser engineering. 5th rev. and updated ed. New York: Springer, 1999, xi, 746 p. ISBN 35-406-5064-4.
- [9] VRBOVÁ, Miroslava, JELÍNKOVÁ, Helena, GAVRILOV, Petr. Úvod do laserové techniky. Praha, 1998, 228 s. ISBN 80-010-1108-9
- [10] REICHL J. VŠETIČKA M. Emise a absorpce světla. [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>
- [11] HUMÁR, A.: Technologie obrábění – 3.část, VUT Brno 2005
- [12] MAŇKOVÁ, I.: Progresivné technologie, Viena, Košice 2000
- [13] PALMA, A. 2013. Zpracování materiálů studeným laserem [online]. 10.4. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zpracovani-materialu-studenym-laserem.html>
- [14] It. Možné dělení typů a druhů laserů. [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>

- [15] Maturita. Zpracování materiálů pomocí laseru. [online]. [cit. 2020-04-14] [.http://www.maturita.cz/referaty/referat.asp?id=1358](http://www.maturita.cz/referaty/referat.asp?id=1358)
- [16] JAVŮREK, Jan. *Fototerapie biolaserem: léčebná metoda budoucnosti*. Vyd. 1. Praha: Grada, 1995, 201 s. ISBN 80-716-9046-5.
- [17] NAVRÁTIL, Leoš. *Lasery a pulzní magnety v terapii*. 1. vyd. Praha: Alberta, 1994, 93 s. ISBN 80-857-9209-5.
- [18] KOLÁŘOVÁ, Hana, DITRICHOVÁ, Dagmar. *Laserové záření v medicíně*. 1. vyd. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 1996, 37 s. ISBN 80-706-7608-6.
- [19] ŠMÍD, Jiří. 2013. Slab, innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser? [online]. 14.3. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser.html>
- [20] Vuts. Laserové kalení. [online], [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.vuts.cz/laserove-kaleni-1.html>
- [21] MÜLLER, J. 3D obrábění laserem. [online], [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.ok-form.cz/3d-obrabeni-laserem>
- [22] Lascam. 2017. Mikroobrábění [online]. 12.6. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/mikroobrabeni/>
- [23] ŘASA, J.; POKORNÝ, P.; GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. 2.díl. Praha: SCIENTIA, 2001. 224s. ISBN 80-7183-227-8.
- [24] Spilasers. Plastic Marking With a Fiber Laser. [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/application-marking/fiber-laser-marking-of-plastics/#>
- [25] It. Bezpečnost laseru Třídy 1 až 4 [online]. [cit. 2020-04-19] Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/bezpecnost-laseru-tridy-1-az-4>
- [26] NOVÁK, L. 2013. Třídy bezpečnosti laserů [online]. 20.5. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/tridy-bezpecnosti-laseru/>
- [27] Klasifikace laserů [online], [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/8-kapitola/82/822.html>

- [28] ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. 2008. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 19.3. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [29] DUŠEK, J. 2013. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu [online]. [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- [30] Reference WikiSkript, využití laserů v medicíně [online], [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Speci%C3%A1ln%C3%AD:Citovat&page=Vyu%C5%BEit%C3%AD_laser%C5%AF_v_medic%C3%ADn%C4%9B&id=434307
- [31] ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. 2008. Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 12.5. [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
- [32] PAVEL, G. 2001. Odrazová sklíčka na měsíci [online]. 18.1. [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: http://www.ian.cz/detart_fr.php?id=383
- [33] MachineMFG, Laser cutting vs. Plasma cutting (Ultimate Difference Analysis) [online], Dostupné z: [cit. 2020-07-27]. Dostupný z: <https://www.machinemfg.com/laser-cutting-vs-plasma-cutting/>
- [34] PONCE G. 2019. Laser Cutting – Advantages and Disadvantages [online]. 5.8. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/laser-cutting-advantages-and-disadvantages/>
- [35] PATWA R., HERFURTH H., FLAIG R., CHRISOHERSEN M., PHILIPS B. F. LASER DRILLING FOR HIGH ASPECT RATIO HOLES AND A HIGH OPEN AREA FRACTION FOR SPACE APPLICATIONS [online], [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: https://www.cla.fraunhofer.org/content/dam/ccl-laser/en/documents/papers_micromachining/Laser%20drilling%20for%20high%20aspect%20ratio%20holes%20and%20a%20high%20open%20area%20fraction%20for%20space%20applications.pdf
- [36] Lintech. Laserové vrtání [online], [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/laserove-vrtani>

- [37] Narran Laserové vrtání [online], [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://narran.cz/aplikace-laseru/laserove-vrtani/>
- [38] Twi-global, WHAT ARE THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF LASER DRILLING? [online], [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-laser-drilling>
- [39] KOŘÁN P. 2013. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I (LASER WELDING) [online]. 18.2. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
- [40] KUBÍČEK J. TECHNOLOGIE II, ČÁST SVAŘOVÁNÍ – 2 [online], [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_II_opora_svarovani_2018_II_kubicek.pdf
- [41] Szsunlaser. Various advantages and disadvantages of laser welding machine [online], [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.szsunlaser.com/en/new/hjyyqd.html>
- [42] Lascam. 2017. Kalení efektivně a ekologicky pomocí laseru [online]. 9.5. [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/kaleni-laserem/>
- [43] SCHUBERT S. 2011. Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů [online]. 28.6. [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>
- [44] NOVÁK L. 2013. Základy laserového značení [online]. 3.5. [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/zaklady-laseroveho-znaceni/>
- [45] Spilasers. The Advantages of Laser Marking [online]. [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/application-marking/advantages-laser-marking/>
- [46] ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. 2007. Nekonvenční metody obrábění [online]. 19.7. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni.html>
- [47] Camtechnologies, Wire EDM cutting vs Laser Cutters [online], [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <http://www.camtechnologiesinc.com/wire-edm-cutting-vs-laser-cutters/>

[48] FERRARIS E. CASTIGLIONI V. CEYSSENS F. ANNONI M. LAUWERS B.
REYNAERTS D., EDM drilling of ultra-high aspect ratio micro holes with insulated tools
[online], [cit. 2020-07-29]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850613001169>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Znázornění rozdílu běžného zdroje světla a laserového světla [3].....	10
Obrázek 2 Znázornění přechodu elektronu mezi hladinami [2].....	11
Obrázek 3 Znázornění rezonátoru [2].....	13
Obrázek 4 Rubínový laser [6].	16
Obrázek 5 Pevnolátkový laser s Nd-YAG krystalem [6].	17
Obrázek 6 Schéma helium neonového laseru [6].....	19
Obrázek 7 Schéma konstrukčního provedení CO ₂ laseru [3].	20
Obrázek 8 Schéma konstrukce slab laseru [8].	23
Obrázek 9 Schéma konstrukce kotoučového laseru [5].....	25
Obrázek 10 Schéma vláknového laseru [29]	26
Obrázek 11 Bezpečnostní symbol laseru třídy 2 a vyšší [27].	27
Obrázek 12 Laserový skalpel Sharplan 40C [30].....	33
Obrázek 13 Procento rozdělení jednotlivých technologií [28].	35
Obrázek 14 Schéma řezacího laserového zařízení [11].....	36
Obrázek 15 Pohled do pracovního prostoru během vrtání laserem [31].	37
Obrázek 16 Způsoby svařování materiálu	38
Obrázek 17 Závislost hloubky svaru na rychlosti svařování - výkon laseru 1500 W [31].....	39
Obrázek 18 Princip kalení laserem.....	40
Obrázek 19 Způsoby mikroobrábění [22].....	42
Obrázek 20 Schéma principu popisování materiálu pomocí vychylování paprsku	43
Obrázek 21 Popisování materiálu pomocí masky	44
Obrázek 22 Znázornění metod gravírování a značení materiálu za užití laseru [24].....	45
Obrázek 23 Koutový odražeč na měsíci instalovaný posádkou Apolla 14 [33].	46