



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ

UNCONVENTIONAL TECHNOLOGY OF LASER CUTTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. JAROSLAV INDRA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Jaroslav Indra

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

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

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

### **Nekonvenční technologie laserového řezání**

v anglickém jazyce:

### **Unconventional Technology of Laser Cutting**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nasazení laserové technologie v podmínkách zakázkové výroby s požadavkem na pružnou reakci při změně sortimentu.

Cíle diplomové práce:

Obecné možnosti laserové technologie.

Volba typového představitele vhodných dílů.

Organizace TPV pro laserové pracoviště.

Návrhy na opatření na zvýšení pružnosti výroby při změně sortimentu.

Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Seznam odborné literatury:

1. BARCAL, J. Nekonenční metody obrábění, Skriptum FSI ČVUT, Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.
2. KOČMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. MAŇKOVÁ, I. Progresivní technologie, 1 vyd. Košice: Vienala, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
4. BENKO, B., FODEREK, P., KOSEČEK, M., BIELAK, R.I. Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
5. OBERG, E., JONES, F.D., HORTON, H.L., RYFFEL, H.H. Machinery's hand-book. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. 2547 s. ISBN 0-8311-2595-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Práce se zabývá technologií laserového řezání. Počátek je věnován obecnému popisu laserové technologie a rozdělení laserů do základních skupin. Následná část zmiňuje možné průmyslové využití laserového paprsku, a to především pro řezání. Další kapitoly se zabývají díly vhodnými pro výrobu touto technologií, technickou přípravou výroby a návrhem na zvýšení pružnosti výroby při změně sortimentu. Poslední část je věnována technicko-ekonomickému zhodnocení.

### Klíčová slova

Nekonvenční technologie, řezání laserem, paprsek, zakázková výroba, ocel

## ABSTRACT

The thesis deals with the technology of laser cutting. The beginning is concerned with a general description of laser technology and laser division into basic groups. Next part refers to possible industrial use of laser beam, especially for cutting. Other chapters deal with the components suitable for the manufacture of this technology, technical preparation of production and the proposal to increase manufacturing flexibility when changing products. The last part is devoted to technical and economic evaluation.

### Key words

Unconventional technology, laser cutting, beam, custom manufacturing, steel

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

INDRA, Jaroslav. *Nekonvenční technologie laserového řezání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 61 s., 1 příloha. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Nekonvenční technologie laserového řezání“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 25. 5. 2011

.....  
Jaroslav Indra

## **Poděkování**

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování práce. Dále děkuji pracovníkům firmy Technologické centrum, a. s., zejména pak panu Danu Popelkovi a Jaroslavu Daňkovi za praktické zkušenosti a možnost vypracování práce s pomocí reálných podmínek výroby.

**OBSAH**

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 ZÁKLADY LASEROVÉ TECHNOLOGIE.....	10
1.1 Historie.....	10
1.2 Fyzikální princip.....	12
1.3 Konstrukce laserového zařízení.....	15
2 DRUHY A ROZDĚLENÍ LASERŮ.....	16
2.1 Dle aktivního prostředí.....	16
2.1.1 Plynové lasery.....	16
2.1.2 Pevnolátkové lasery.....	20
2.1.3 Kapalinové lasery.....	22
2.1.4 Polovodičové lasery.....	23
2.2 Buzení aktivního prostředí.....	23
2.2.1 Optické buzení.....	24
2.2.2 Buzení elektrickým polem.....	24
2.2.3 Buzení chemickou reakcí.....	24
2.3 Laser a bezpečnost.....	25
2.4 Porovnání laserových technologií.....	26
2.5 Porovnání laseru s jinými nekonvenčními metodami řezání.....	27
3 PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ LASEROVÉHO PAPRSKU.....	28
3.1 Technické plyny pro laser.....	29
3.1.1 Rezonátorové plyny.....	30
3.1.2 Asistenční plyny.....	30
3.2 Řezání laserem.....	31
3.2.1 Tavné řezání.....	31
3.2.2 Oxidační řezání.....	31
3.2.3 Sublimační řezání.....	32
3.2.4 Řezání s podporou vzduchu.....	32
3.2.5 Kvalita řezu.....	32
3.2.6 Řezání nekovových materiálů.....	33
3.3 Svařování laserem.....	34
3.4 Další využití laserového paprsku.....	35
3.4.1 Vrtání laserem.....	35
3.4.2 Značení a gravírování laserem.....	35
3.4.3 Tepelné zpracování laserem.....	35
4 TYPOVÉ PŘEDSTAVITELE VHODNÝCH DÍLŮ.....	37
4.1 Parametry materiálu.....	37

4.2 Tvar součástí.....	39
4.3 Sériovost výroby .....	41
4.4 Vlastní zkušební součást.....	42
5 TPV LASEROVÉHO PRACOVÍŠTĚ .....	44
5.1 Firma Technologické centrum, a. s.....	45
5.1.1 Nabízené služby.....	45
5.2 TPV ve firmě Technologické centrum, a. s.....	46
5.2.1 Konstrukční příprava výroby.....	46
5.2.2 Technologická příprava výroby .....	46
5.2.3 Technicko-ekonomický úsek .....	47
5.3 Výrobní úsek laserového pracoviště.....	48
6 NÁVRH NA ZVÝŠENÍ PRUŽNOSTI VÝROBY .....	49
6.1 Stávající řešení.....	49
6.2 Návrh nového řešení .....	50
6.2.1 Technické parametry zvoleného obslužného systému .....	51
6.2.2 Zhodnocení zvolené varianty .....	52
7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ.....	53
7.1 Technické hodnocení řezání laserem.....	53
7.2 Ekonomické hodnocení řezání laserem.....	53
7.2.1 Faktory ovlivňující cenu výrobku .....	53
7.2.2 Vyhodnocení konkrétní ceny výrobku.....	54
Závěr.....	56
Seznam použitých zdrojů.....	57
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	60
Seznam příloh.....	61

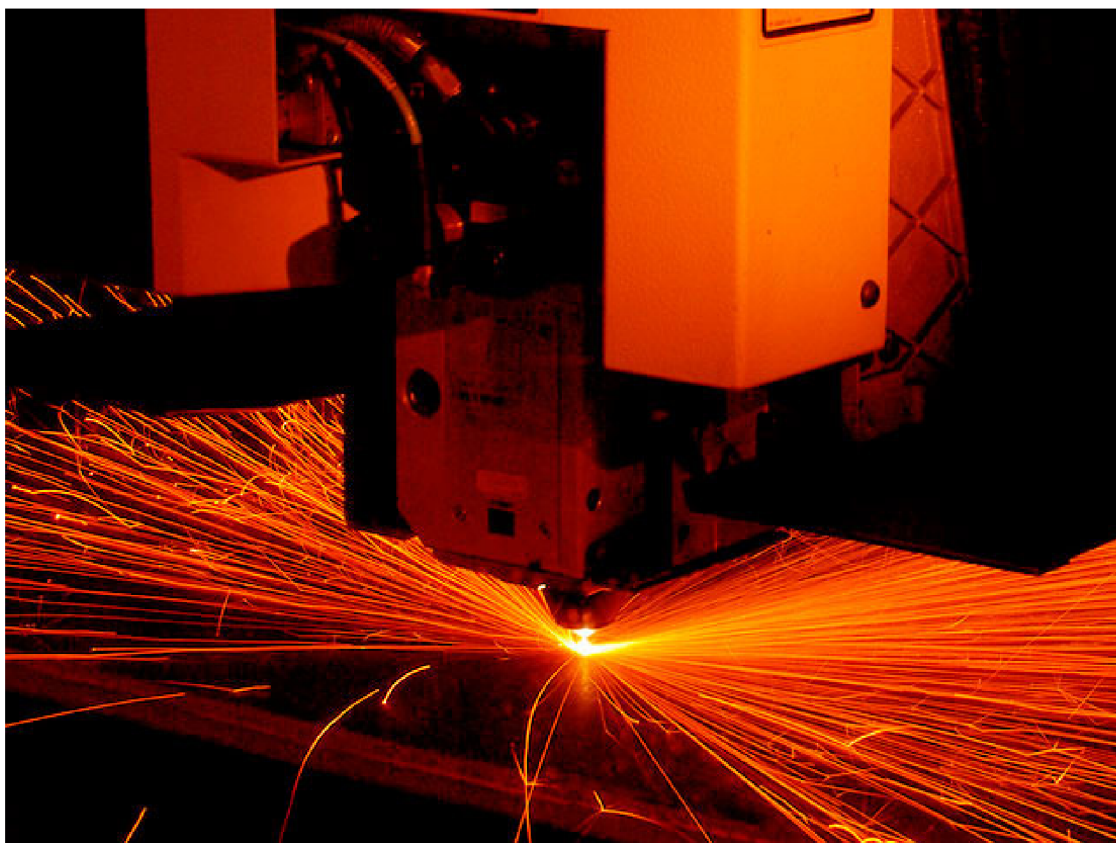


## ÚVOD

Technologie laserového řezání patří do skupiny nekonvenčních metod obrábění. Tyto metody využívají pro obrábění či řezání procesy fungující na fyzikálních principech a zákonitostech o erozi materiálu. Výhoda těchto postupů spočívá především v tom, že nedochází k přímému kontaktu nástroje s obrobkem, jelikož je tu nástroj zastoupen formou koncentrované energie. Obecně je používání fyzikálních (nekonvenčních) technologií obrábění opodstatněno tam, kde je nutno obrábět a dělit vysoce pevné materiály a kde z hlediska technického a ekonomického se nevyplatí popř. nelze použít klasické rezné nástroje.

V dnešní době se s laserovou technologií nesetkáváme pouze v průmyslu, ale je široce zastoupena v běžném životě. Setkáváme se s ní např. ve výpočetní a komunikační technice, v zábavním průmyslu, v metrologii, v medicíně, ve zbrojním průmyslu atd.

Ve strojírenském průmyslu se laser využívá především pro svařování a dělení materiálu, vrtání, gravírování a značení v neposlední řadě také pro tepelné zpracování a povrchové úpravy. Velmi aktuální je také použití laserového paprsku u technologií reverzního inženýrství, kde jsou jeho pomocí natavovány a spékány kovové prášky do finální podoby modelu<sup>1,2</sup>.



Obr. 1 Pohled na laserovou hlavu při vpichu do řezaného materiálu<sup>3</sup>

# 1 ZÁKLADY LASEROVÉ TECHNOLOGIE

Tato kapitola obsahuje stručné seznámení s problematikou týkající se laseru.

## 1.1 Historie

Za počátek vývoje LASERU je považován rok 1917, kdy Albert Einstein dokázal, že kromě jevů, jako jsou spontánní emise a absorpce záření, existuje ještě stimulovaná emise záření<sup>4</sup>. Podrobnější vývoj laseru je popsán níže formou historických mezníků ve vývoji laseru.

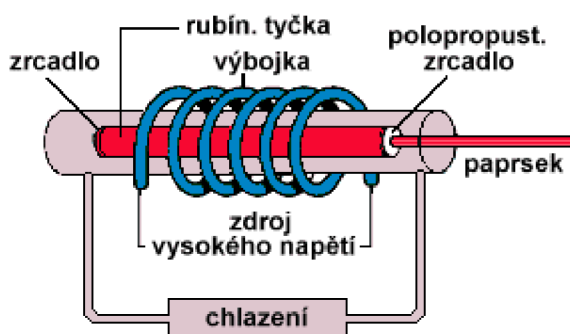
### Sestrojení prvního laseru

Theodor Maiman v roce 1960 získal první paprsky laserového světla. Předtím však musel vyřešit tři základní technické problémy:

- jaké použít aktivní prostředí, v němž by docházelo ke stimulované emisi,
- docílit, aby atomy aktivního prostředí přešly na vyšší energetickou hladinu (buzení atomů),
- jak zajistit, aby v aktivním prostředí docházelo ke stimulované emisi záření.

Jeho prototyp laseru (obr. 1.1) byl sice primitivní, ale i dnešní moderní a výkonné laserové přístroje vychází z jeho základu:

- aktivní prostředí tvořil krystal syntetického rubínu,
- buzení atomů na vyšší energetickou hladinu se provádělo krátkými světelnými záblesky výbojky,
- zesílení světla stimulovanou emisí vznikalo mezi dvěma rovnoběžnými zrcadly.



Obr. 1.1 Rubínový laser - prototyp laseru<sup>4</sup>

**Historické mezníky ve vývoji laseru<sup>4,5</sup>**

- **1917** Albert Einstein ukázal, že kromě absorpce a emise záření existuje ještě stimulovaná emise, při níž dochází k zesílení světla, procházejícího látkou.
- **1928** Stimulovaná emise byla poprvé pozorována R. Ladenburgem a H. Kopfermannem v plynu.
- **1939** Ruský fyzik V. A. Fabrikant navrhl využít stimulovanou emisi v plynném prostředí k zesilování světla.
- **1947** Britsko-maďarský vědec D. Gabor vypracoval teorii holografie.
- **1954** Ruští fyzikové N. G. Basov a A. M. Prochorov a americký fyzik Ch. H. Townes položili základy novému fyzikálnímu oboru - kvantové elektronice. Byl sestrojen první maser, ve kterém docházelo ke vzniku mikrovlnného záření molekul čpavku.
- **1958** Američtí vědci A. L. Schawlow a Ch. H. Townes publikovali v odborném časopise Physical Review článek "Infračervený a optický maser". V něm navrhli konstrukci optického kvantového generátoru, později nazvaného "laser".
- **1960** Theodore H. Maiman, pracující v laboratořích firmy Hughes Aircraft, zkonstruoval první laser, jeho aktivní látkou byla tyčinka ze syntetického rubínu. Vydával červené světlo o vlnové délce 694,3 nm.
- **1960** A. Javan, W. Bennett a D. Herriott sestrojili první plynový laser, aktivní látkou byla směs helia a neonu. Vlnová délka jeho světla byla 1150 nm. Začal bouřlivý vývoj různých typů laserů a hledání jejich využití.
- **1962** Vznikly první polovodičové lasery, využívající přechodu p-n (R. Hall). Musely být chlazeny kapalným dusíkem.
- **1964** Basov, Prochorov a Townes obdrželi Nobelovu cenu za fyziku jako ocenění zásluh o vznik a rozvoj kvantové elektroniky.
- **1964** Kumar Patel sestrojil první výkonný laser s oxidem uhličitým jako aktivní látkou, vlnová délka záření 1060 nm.
- **1964** První neodymový laser (Nd:YAG) uvedli do provozu J. F. Geusic a R. G. Smith.
- **1965** První chemický laser, ve kterém dochází k buzení energií, uvolněnou při chemických reakcích vodíku s chlorem.
- **1965** Pomocí laserového světla byly vytvořeny první hologramy.
- **1971** I. Hayashi a M. Panish zkonstruovali první polovodičový laser pracující při pokojové teplotě.

## 1.2 Fyzikální princip

Slovo LASER pochází z anglického slovního spojení **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, což lze přeložit jako: zesílení světla stimulovanou emisí záření. Je to optický zdroj elektromagnetického záření (světla) specifických vlastností.

Světlo laseru je koherentní, monochromatické a směrové. Žádný jiný zdroj světla všech těchto vlastností nevyzařuje.

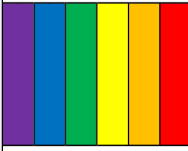
### **Světlo** - elektromagnetické záření<sup>4</sup>

**Koherentní** - je to světlo tvořené ze světel, která mají v určitém okamžiku a místě stejnou vlnovou délku a fázi. Běžné zdroje světla vyzařují světlo nekoherentní.

**Monochromatické** - je to světlo jednobarevné, obsahuje jen jednu vlnovou délku.

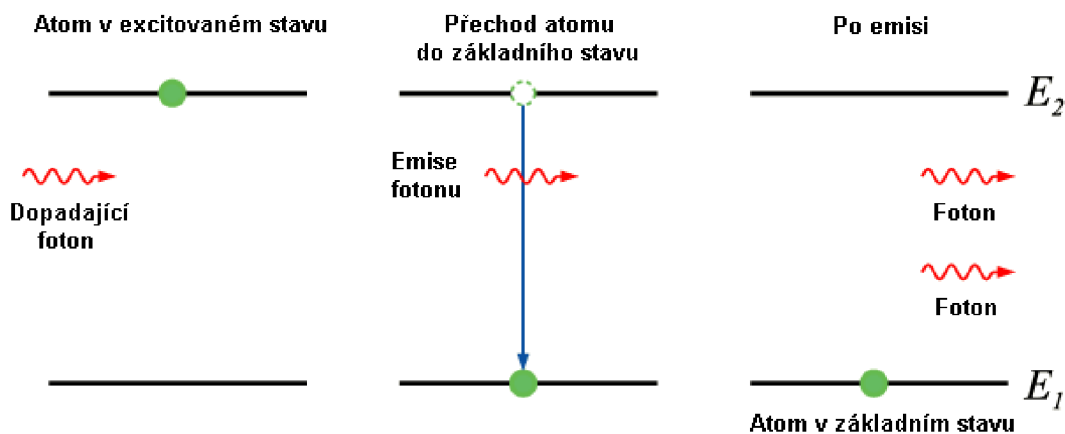
**Směrové** - záření z laseru vychází ve formě úzkého paprsku o průměru menším než 1 mm.

Tab. 1.1 Elektromagnetické záření

Gama záření	Rentgenové záření	Ultrafialové záření	Viditelné záření	Infračervené záření	Mikrovlnné záření	Rádiové záření
- Jaderná fyzika	- Lékařská diagnostika - Strukturní analýza krystalů	- Kopírovací stroje - Solárium - Fotochemie	 - viditelné spektrum	- CO <sub>2</sub> LASER	- Mikrovlnné trouby	- Rozhlas - Televize
$10^{-11}$	$10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$7,6 \cdot 10^{-7}$	$10^{-4}$	$10^{-1}$	
Vlnová délka [m]						

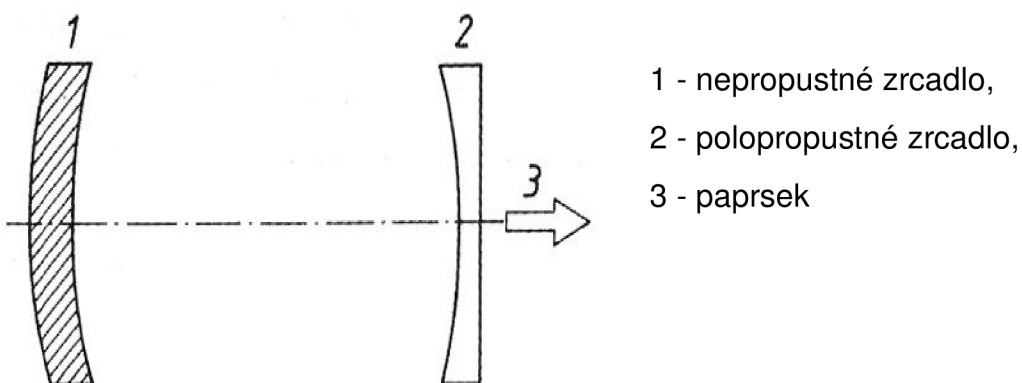
Vznik laserového paprsku funguje na principu stimulované emise záření (obr. 1.2), ta ke svému vzniku potřebuje vnější podmět, kterým je elektromagnetické záření působící na atom prvku aktivního prostředí. Jeho pomocí elektrony přejdou ze základní energetické hladiny do vyšší energetické hladiny (excitace). Takto je vybuzena do vyšších energetických stavů většina elektronů aktivního prostředí. Tento nerovnovážený stav v atomu

má za následek přestup elektronu zpět na nižší energetickou hladinu. Při tomto ději dochází zároveň k vyzáření světelné energie ve formě fotonu<sup>1,6</sup>.



Obr. 1.2 Stimulovaná emise v energetických hladinách<sup>7</sup>

K zesílení tohoto záření dojde v optickém rezonátoru (obr. 1.3), ten je tvořen dvěma zrcadly, z nichž jedno je polopropustné. Fotony vznikající stimulovanou emisí se odráží od zrcadel a stimulují další vybuzené atomy. Tímto způsobem intenzita záření postupně narůstá až do překročení určité hranice, při níž dojde k prostoupení paprsku polopropustným zrcadlem. Po vyzáření fotonů se atomy vrátí do základního energetického stavu a po záblesku výbojky, tzv. buzení, se děj opakuje<sup>4</sup>.

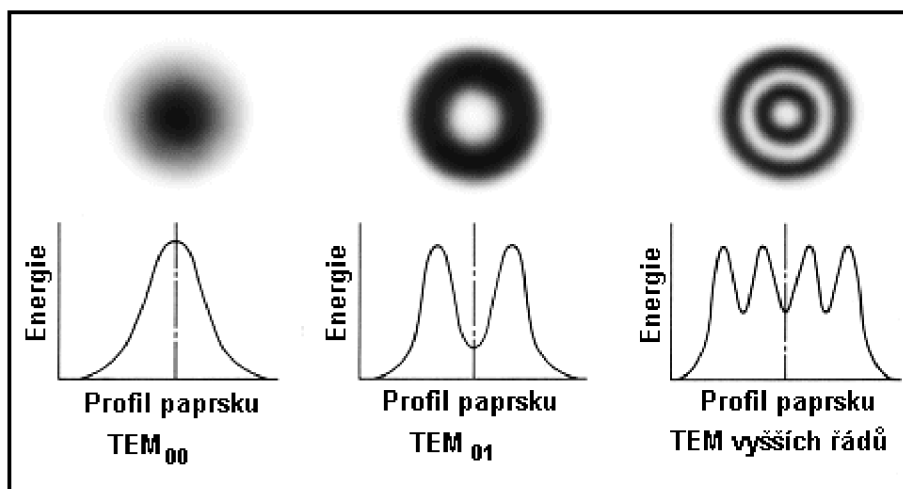


Obr. 1.3 Optický rezonátor<sup>6</sup>

Rozdělení intenzity záření v průřezu výstupního paprsku laseru určuje parametr mód. To je označení pro vlastní kmity elektromagnetického pole v rezonátoru charakterizované danou frekvencí a zvláštnostmi rozložení pole v rezonátoru<sup>6</sup>.

Základní mód je pro většinu technologických operací označován jako  $TEM_{00}$  (obr. 1.4), kde je intenzita záření rozdělena podle Gaussovy křivky.

Rozdělení intenzity záření  $TEM_{10}$  se používá např. pro tepelné zpracování nebo povlakování<sup>6</sup>.



Obr. 1.4 Intenzita záření v průřezu výstupního paprsku laseru<sup>8</sup>

Mód - označení pro vlastní kmity elektromagnetického pole v rezonátoru.

TEM - Transverse Electro-Magnetic Modes (příčný elektromagnetický mód)

Obvykle se používá značení  $TEM_{pq}$  pro specifikaci TEM módu, kde „p“ značí počet radiálních nulových polí a „q“ je počet úhlových nulových polí<sup>9</sup>.

Tab. 1.2 Přehled vlnových délek dle aktivního prostředí laseru<sup>4</sup>

Aktivní prostředí	Vlnová délka [nm]	Záření
argon - fluor	193	UV
krypton - fluor	248	UV
xenon - chlor	308	UV
helium - kadmium	325, 442	UV, viditelné
argon	488, 514	viditelné
rubín	694	viditelné
Nd:YAG	532, 1064	viditelné, IČ
helium - neon	543, 633, 1150, 3390	viditelné, IČ
polovodičové diody	630 - 1600	viditelné, IČ
oxid uhličitý	9600, 10600	IČ

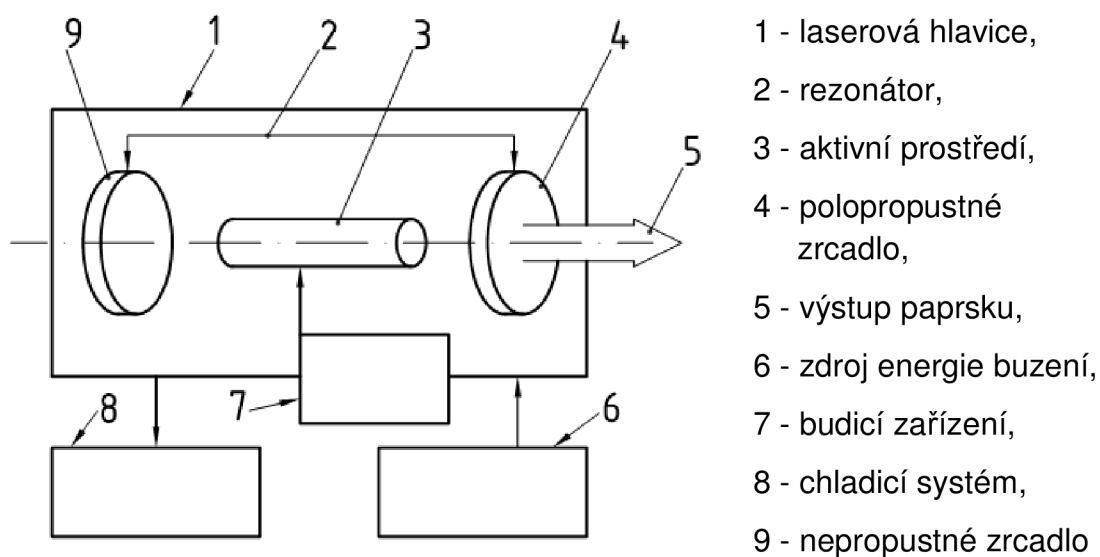
### 1.3 Konstrukce laserového zařízení

Jeden z hlavních prvků laseru tvoří laserová hlavice. Tato část obsahuje aktivní prostředí (laserové médium), na kterém závisí vlnová délka záření. Jedná se o materiál nebo směs materiálů o vhodných energetických hladinách ve skupenství plynném, kapalném či pevném. Toto aktivní prostředí je uzavřeno v nosném materiálu o specifických vlastnostech jako je především průhlednost a schopnost odvádět vzniklé teplo<sup>1,6</sup>.

Dalším prvkem laserové hlavice je rezonátor. Ten je tvořen nejméně dvěma zrcadly - polopropustným a nepropustným zrcadlem. Průměr a zakřivení těchto zrcadel ovlivňuje rozdělení intenzity záření a rozbíhavost paprsku, která určuje úhel, ve kterém se laserový paprsek šíří<sup>1,6</sup>.

Budící zařízení je také součástí hlavice a ovlivňuje pracovní režim laseru. Způsob buzení je pak dán složením laserového media. Plynné skupenství média je nejčastěji buzeno elektrickým výbojem, stejnosměrným nebo střídavým proudem. Pevné médium je většinou buzeno výbojkami nebo diodami. Zdroj energie buzení je řešen jako speciální druh síťového napáječe<sup>1,6</sup>.

Další důležitou součástí laseru je chladicí systém, který odvádí z laserové hlavice nevyužitou energii přeměněnou na teplo. Ten obsahuje zpravidla dva okruhy - vnitřní a vnější. Ve vnitřním se používá deionizovaná voda, ve vnějším upravená voda z vodovodní sítě popř. ze speciálního zásobníku s čerpadlem<sup>1,6</sup>.



Obr. 1.5 Schéma laserového zařízení<sup>6</sup>

## 2 DRUHY A ROZDĚLENÍ LASERŮ

Lasery lze klasifikovat do skupin podle několika různých hledisek, např.

podle - druhu aktivního prostředí,

- buzení aktivního prostředí,
- vlnové délky optického záření,
- počtu energetických hladin,
- režimu provozu - délky generovaného pulzu<sup>6</sup>.

Níže je provedeno rozdělení laserů podle dvou nejpoužívanějších základních kritérií, a to dle aktivního prostředí a jeho buzení.

### 2.1 Dle aktivního prostředí

Dle aktivního prostředí se lasery dělí na

- plynové,
- pevnolátkové,
- kapalinové,
- polovodičové<sup>6</sup>.

#### 2.1.1 Plynové lasery

Plynové lasery patří k nejstarším typům průmyslově využívaných laserů. Aktivní prostředí je v plynné fázi a může být tvořeno atomy, ionty nebo molekulami. Plynové lasery pracují v širokém rozsahu vlnových délek v kontinuálním nebo pulzním režimu. Jejich buzení je možné pomocí elektrického výboje, chemické reakce, opticky atd.

Do skupiny těchto laserů patří

- helium-neonový laser,
- helium-kadmiový laser,
- jódový laser,
- argonový laser,
- vodíkový laser,
- dusíkový laser,
- excimerový laser,
- CO<sub>2</sub> lasery a další.

Z uvedených laserů jsou v průmyslu nejčastěji využívány CO<sub>2</sub> lasery, v menší míře dále excimerové lasery<sup>10</sup>. Proto jsou tyto typy podrobněji popsány níže.

Výhoda plynových laserů spočívá v homogenním aktivním prostředí, které zajišťuje jejich výborné parametry. Tento druh laseru patří k nejvýkonnějším

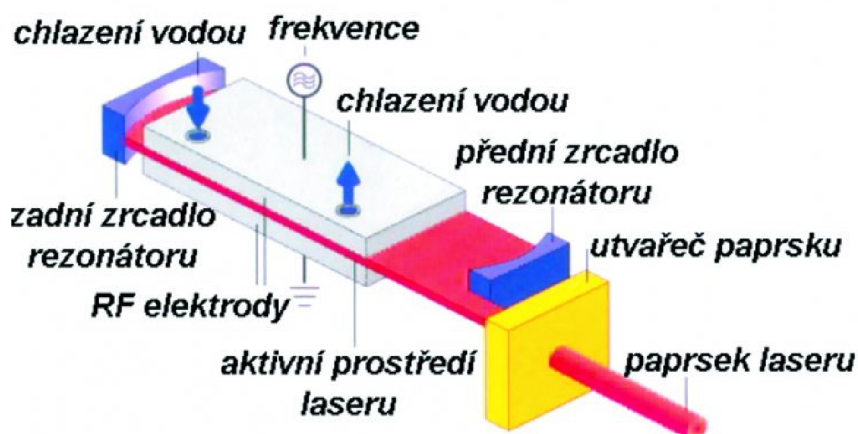


typům. Nevýhodou těchto laserů je, že nemohou vést výstupní paprsek od jeho zdroje k místu užití optickým vláknem<sup>4,6,11</sup>.

### CO<sub>2</sub> lasery

Aktivní prostředí je tvořeno molekulami oxidu uhličitého. Buzení provádí elektrický výboj, který zapaluje směs plynů (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He). Tento druh laseru se vyrábí až do výkonu 20 kW. Lasery se středním výkonem (do 6 kW) jsou zpravidla používány pro řezání ocelových plechů do tloušťky 25 mm. Pro svou flexibilitu jsou vhodné pro nasazení i při malých sériích. Výkony nad 6 kW jsou používány zejména pro svařování v automatizované velkosériové výrobě (hloubka svaru až 20 mm). Energetická účinnost těchto laserů se pohybuje v rozmezí 10 až 15 %<sup>11,12</sup>.

Novou technologií dělení křehkých a obtížně řezatelných materiálů běžným CO<sub>2</sub> laserem, jako je např. keramika, polovodiče nebo i sklo, umožňuje laser Jenoptik-Votan G. Zde se k dělení využívá vnitřního pnutí materiálu. Nejprve dojde k povrchovému naříznutí spáry laserem, k lomu dochází až následným ochlazením součásti s vyvoláním pnutí. Tento patentovaný způsob je rychlejší a vzniklý povrch řezu je zcela bez mikrotrhlin v porovnání s klasickým laserovým dělením<sup>11</sup>.



Obr. 2.1 Konstrukce rezonátoru CO<sub>2</sub> laseru<sup>6</sup>

Existuje několik konstrukčních uspořádání CO<sub>2</sub> laserů v závislosti na toku pracovního plynu.

### **CO<sub>2</sub> lasery s pomalým prouděním plynu**

Tento nejstarší typ CO<sub>2</sub> laseru je s pomalým podélným prouděním plynu rezonátorem. Aktivnímu prostředí se přivádí energie elektrickým výbojem, ten má směr totožný s osou rezonátoru i se směrem výstupního laserového paprsku. Laser při tomto uspořádání dosahuje výkonu přibližně 50 W na metr délky výbojové trubice v rezonátoru. Vlastností je dobrá módová charakteristika paprsku a stabilní výstupní výkon přibližně 1 kW. Toho je využíváno pro kvalitní řezání materiálů odpovídají tloušťky<sup>13</sup>.

### **CO<sub>2</sub> lasery s rychlým podélným prouděním plynu**

V tomto konstrukčním uspořádání proudí aktivní plyn podélně vysokou rychlostí rezonátorem. Chlazení plynu je zajišťováno mimo rezonátor.

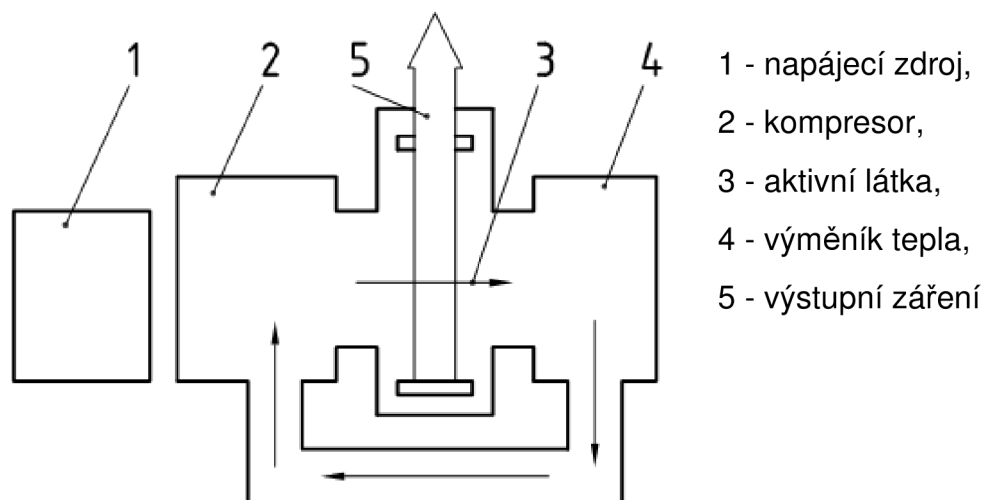
Laser je kompaktní konstrukce a dosahuje výkonu 0,5 až 1 kW na metr délky výbojové trubice rezonátoru. Módová struktura záření je poměrně dobrá, často ale dochází k rychlému kolísání módu, což může vést ke zhoršení kvality řezu. Výstupní výkon se pohybuje v rozmezí 0,5 až 5 kW.

Běžný typ napájení byl především typu DC (stejnoseměrné). Nyní se však stále častěji používají RF lasery, které jsou napájeny proudem o vysoké frekvenci v oblasti kHz AC (střídavě). Tato změna vede ke zvýšení stability paprsku. Proto jsou dnes používané převážně RF lasery s pulzním i kontinuálním režimem o výkonu i více než 5 kW. Použití nachází převážně při řezání materiálu<sup>13</sup>.

### **CO<sub>2</sub> lasery s rychlým příčným prouděním plynu**

U tohoto typu laseru jsou laserový paprsek, proudění plynu a elektrický výboj ve třech různých směrech. Jedná se o kompaktní konstrukci s výkonem až 1 kW na metr délky výbojové trubice rezonátoru. Výboj je obtížně říditelný a módová struktura paprsku zde není pro řezání příznivá. Proto se lasery s příčným prouděním plynu a výkonem až do 20 kW používají převážně pro svařování a tepelné zpracování kovových materiálů.

Podobně jako u CO<sub>2</sub> laserů s podélným prouděním jsou obvyklé typy s příčným prouděním napájeny DC výbojem. Existují již však i RF lasery napájené proudem o vysoké frekvenci AC, které jsou mnohem lépe říditelné<sup>13</sup>.

Obr. 2.2 Schéma CO<sub>2</sub> laseru s rychlým příčným prouděním plynu<sup>12</sup>

### Excimerové lasery

Buzení u těchto laserů se provádí elektrickým výbojem nebo svazkem rychlých elektronů<sup>6</sup>, aktivní prostředí tvoří speciální druh molekul, tzv. excimery. Tyto molekuly mohou existovat pouze ve vybuzeném stavu, při návratu do základního stavu se rozpadnou na jednotlivé atomy. Výraz „excimer“ pochází jako zkratka ze slov „excited dimer“ neboli excitovaná molekula. Excimerové molekuly vznikají při srážkách atomů plynů se svazkem elektronů o vysoké energii. Jako plynová náplň se nejčastěji používá kombinace halogenů a vzácných plynů (tab. 2.1). Výkon těchto laserů se pohybuje řádově ve stovkách wattů<sup>4,11,12</sup>.

Tab. 2.1 Porovnání vybraných druhů excimerových laserů<sup>12</sup>

Plyn	F <sub>2</sub>	ArF	KrCl	KrF	XeCl	XeF
Vlnová délka [nm]	157	193	222	249	308	351
Energie impulzu [mJ]	12	1000	25	1500	1000	400
Průměrný výkon [W]	1	100	2-3	200	100	50
Frekvence pulzů [Hz]	100	250	200	500	250	200
Délka impulzu [ns]	6	8-14	4-9	12-16	8-40	8-18

Mezi výhody tohoto druhu laserů patří krátká vlnová délka (UV záření) s dobrou fokusací paprsku a krátkými pulzy. Díky tomu poskytují tyto lasery opracování s ostrými okraji a minimálně tepelně ovlivňují okolí dopadu

paprsku. Pro technologické aplikace se používají k popisování součástí nebo vrtání, dále mají využití v oblastech elektroniky, jemné mechaniky a lékařství<sup>11,6</sup>.

### 2.1.2 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery patří společně s plynovými k nejužívanějším typům průmyslových laserů pro výkony běžně do 10 kW. Aktivní prostředí tvoří pevná krystalická, popř. amorfni opticky propustná látka (krystaly, oxidy, sklo, keramika,...).

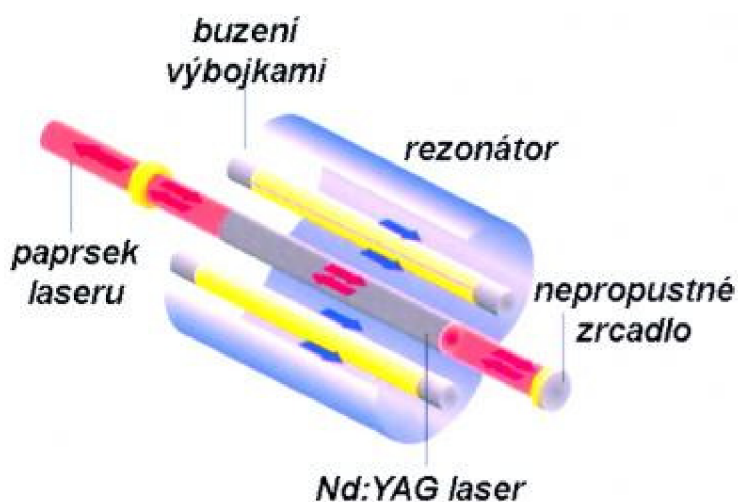
Do skupiny těchto laserů patří

- rubínový laser,
- vláknový laser,
- Nd:YAG laser,
- Nd:YLF laser,
- Er:YAG laser a další.

Z uvedených typů je dnes průmyslově nejčastěji užíván Nd:YAG laser, ale dostávají se do popředí i diskové a vláknové lasery<sup>6,10,11</sup>.

#### Nd:YAG laser

Aktivním prostředím je yttriohlinitý granát (yttrium aluminum garnet - YAG) dopovaný ionty neodymu. Buzení je optické pomocí kryptonových výbojek nebo výkonových diod. Laser pracuje v pulzním i kontinuálním režimu s vlnovou délkou paprsku 1,06  $\mu\text{m}$ . V kontinuálním režimu dosahuje max. výkonu přibližně 6 kW, v pulzním provozu řádově až GW. Účinnost Nd:YAG laserů se pohybuje na hranici 5 %, což je nevýhodou především z hlediska potřeby intenzivního chlazení přístroje<sup>11,12</sup>.



Obr. 2.3 Konstrukce Nd:YAG laseru<sup>6</sup>

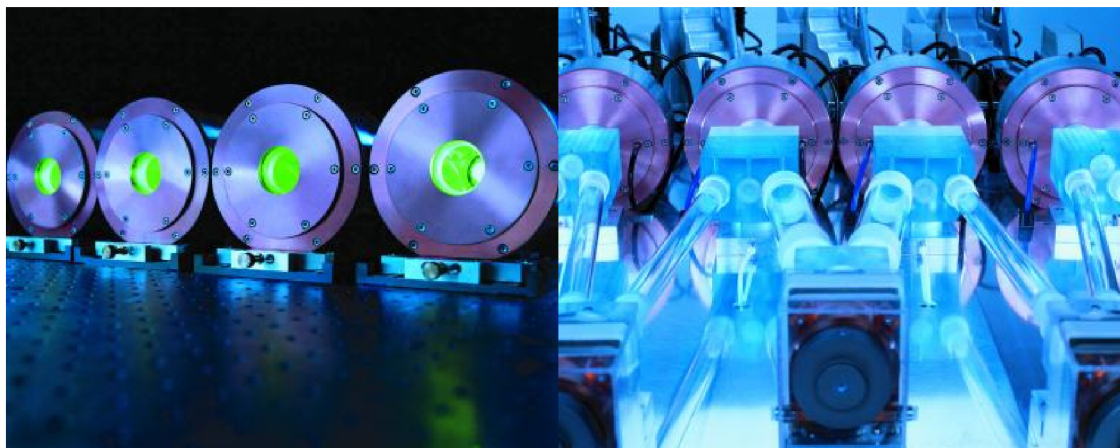
Jejich výhodou je možnost vedení výstupního paprsku optickým vláknem, což je použitelné zejména pro automatizované a robotizované pracoviště. Z toho plyne vhodnost použití např. v automobilovém průmyslu pro svařování dílů karoserií pomocí robotizovaných pracovišť. Další využití nachází také při vrtání, řezání, popisování a spékání nebo natavování materiálů v procesech Laser Prototyping, Laser Tooling a Laser Manufacturing. Používá se také v lékařství, kontinuální jako skalpel a pulzní v oční mikrochirurgii<sup>6,11</sup>.

### Rubínový laser

Tento nejstarší druh laseru byl už v šedesátých letech využíván např. pro vyvrtávání otvorů v diamantech<sup>12</sup>. Aktivní prostředí tvoří krystal  $\text{Al}_2\text{O}_3$  s nepatrnou příměsí chromu (rubín). Buzení je prováděno absorpcí světelné energie z výbojek, vyžaduje však značný čerpací výkon. Pracuje v pulzním režimu. V dnešní době je v průmyslu nahrazen jinými pevnolátkovými lasery, především Nd:YAG laserem<sup>6</sup>.

### Kotoučový laser

Aktivní krystal zde nemá tvar válce jako např. u klasického Nd:YAG laseru, ale je ve formě tenkého kotouče tloušťky řádově v desetinách mm a průměru až 100 mm. Pro buzení aktivního média je u těchto laserů důležitý vícenásobný přechod záření od laserové diody přes odrazivé vrstvy jedné strany kotouče a okolních reflektorů. Vývoj tohoto typu laseru přináší od původní 1 kW verze výkon až za hranici 10 kW.



Obr. 2.4 Kotoučový laser<sup>14</sup>

Výhodami jsou kompaktní konstrukce a snadné chlazení, které z ní vychází. Teplo je odváděno přes kontaktní chladič, který ho odebírá z druhé strany kotouče krystalu. Chlazení až do kilowattového výkonu postačuje

vzduchem. Výhodou je také možnost vedení výstupního paprsku pomocí optických vláken, podobně jako u Nd:YAG laseru. Tímto uspořádáním se také dosahuje lepší kvality výstupního paprsku - zaostření, hloubka ostrosti paprsku, kvalita paprsku neklesá se zvětšujícím se výkonem. Využití tyto lasery nachází ve stejných oblastech jako klasické Nd:YAG lasery, popř. tam, kde je zapotřebí ještě vyšší kvality výstupního paprsku<sup>14</sup>.

### **Vláknový laser**

Na rozdíl od ostatních pevnolátkových laserů, kde optické vlákno slouží jen k přenosu paprsku od místa vzniku na místo užití, u vláknových laserů dochází ke vzniku laserového záření až v jádru optického vlákna dopovaného prvky vzácných zemin<sup>11</sup> (prvky ze skupiny lanthanoidů), nejčastěji erbium, ytterbium a praseodym<sup>14</sup>. V analogii konstrukce je tak krystal nahrazen optickým vláknem. Zrcadla rezonátoru jsou nahrazena tzv. Braggovskými mřížkami – strukturami vytvořenými ve vlákně. Buzení zajišťují polovodičové diody, vlnová délka je stejná jako u Nd:YAG laseru 1,064  $\mu\text{m}$ . Energetická účinnost je oproti konvenčním pevnolátkovým laserům (rubínový, Nd:YAG) vyšší a činí přibližně 25 %<sup>13</sup>. Výkon však činí 2 až 30 W, proto se používají např. pro značení, vrtání mikro otvorů a mikrořezání<sup>10</sup>.

Výhodou plynoucí z principu funkce vláknového laseru je vhodnější a intenzivnější způsob chlazení než např. u kotoučových laserů. Chlazení vzduchem zde působí na vlákno po celé jeho i několikametrové délce. Dále zde není potřeba nastavování rezonátorů či speciální optiku, jinak nutnou u ostatních typů laserů pro navazování výkonu do výstupního optického vlákna. Další výhodou je nízký příkon, v porovnání s pevnolátkovým laserem buzeným výbojkami je požadovaný příkon pouze 1 % energie, a to s vynikající kvalitou paprsku. Lze dosáhnout intenzity záření  $10^9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  a více<sup>14</sup>.

### **2.1.3 Kapalinové lasery**

Nejrozšířenější podskupinu tvoří tzv. barvivové lasery. Aktivním prostředím jsou roztoky různých organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných zemin. Pomocí kombinace několika druhů těchto kapalin a metod tzv. nelineární optiky lze dosáhnout u výstupního paprsku vlnových délek v rozmezí 0,3  $\mu\text{m}$  až 1,5  $\mu\text{m}$ . Buzení je prováděno optickým zářením. Díky tomuto rozmezí vlnových délek se kapalinové lasery užívají především ve spektroskopii, dále také v medicíně. Hlavní nevýhodou těchto laserů je krátká životnost daná rozkladem aktivního prostředí za působení tepla a světla<sup>4,6</sup>.

Tyto lasery se pro technologické aplikace téměř nepoužívají, proto je zde uveden pouze tento obecný úvod.

### **2.1.4 Polovodičové lasery**

Polovodičové lasery patří k nejmodernějším typům průmyslově využívaných laserů. Aktivním prostředím je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi volné nosiče náboje (elektrony).

Velkou výhodou polovodičových laserů je jejich malá velikost, vysoká účinnost (až 50 %), možnost nastavení výkonu změnou elektrického proudu a možnost seřízení rozsahu vlnové délky v rozmezí od 0,3  $\mu\text{m}$  do 30  $\mu\text{m}$ . Mezi nevýhody naopak patří rozbíhavost generovaného záření a vysoká závislost parametrů záření na teplotě aktivního prostředí (polovodičového materiálu)<sup>4,6</sup>.

Do skupiny těchto laserů patří

- diodový laser,
- injekční polovodičový laser.

#### **Diodový laser**

Jedná se o polovodičový laser, kde aktivní prostředí tvoří blok polovodičů. Buzený může být fotony, elektrickým polem a nejčastěji svazkem elektronů. Tyto elektrony procházejí polovodičovým blokem a iniciují přechody z pásu valenčního do pásu vodivostního. Obvyklý výstupní výkon je do 250 W, v sestavě se dosahuje výkonu až 8 kW. Výhodou diodových laserů je dobrá účinnost, nízké provozní náklady a vysoká životnost. Specifickou vlastností je pravoúhlý tvar výstupního paprsku, lze jej však zaostřit i na tvar kruhu. Intenzita záření má téměř konstantní rozložení v paprsku. Průmyslové využití tento druh laseru nachází při řezání a svařování kovových fólií a plastů. Výkonné sestavy lze použít i pro svařování kovů, pájení natvrdo a technologie povrchových úprav. Dále je hojně používán v medicíně, především ve stomatologii<sup>6,11</sup>.

#### **Injekční polovodičový laser**

Aktivní prostředí tvoří polovodiče typu P a N. K buzení dochází elektrickým polem. Průchodem elektrického proudu PN přechodem vzniká za vhodných podmínek světlo. Rezonátor je tvořen vybroušenými stranami polovodičového materiálu. Odrazem od zrcadel rezonátoru a několikanásobným přechodem oblastí přechodu vzniká laserové záření<sup>6</sup>.

## **2.2 Buzení aktivního prostředí**

Druhy buzení aktivního prostředí

- optické buzení,
- buzení elektrickým polem,
- buzení chemickou reakcí.

Kromě uvedených metod se používají i další - buzení vysoce energetickým elektronovým svazkem, expanzí horkého plynu a jiné<sup>4</sup>.

### **2.2.1 Optické buzení**

Optický způsob buzení se používá u kapalinových a pevnolátkových laserů. Energie, potřebná ke vzniku laserového záření, je dodávána formou světelného záblesku. Například v rubínovém laseru je do spirálové výbojky vložena rubínová tyčinka. Zábleskem výbojky dojde k přechodu elektronů na vyšší energetickou hladinu, při jejich návratu do základního stavu se část této energie vyzáří ve formě laserového záblesku<sup>4</sup>.

Představitelé - kapalinové lasery,  
- pevnolátkové lasery - rubínový laser,  
- Nd:YAG laser, ...

### **2.2.2 Buzení elektrickým polem**

Tento způsob buzení se používá u plynových a pevnolátkových laserů. Základem je elektrický výboj, ke kterému dochází v plynové náplni laseru. Tyto lasery pracují v kontinuálním režimu a jejich výkon se dá měnit pomocí změny objemu plynu nebo jeho plynulou cirkulací<sup>4</sup>.

Představitelé - plynové lasery - CO<sub>2</sub> lasery,  
- excimerové lasery.  
- polovodičové lasery - diodové lasery,  
- injekční polovodičové lasery.

### **2.2.3 Buzení chemickou reakcí**

Chemické buzení se používá u plynových laserů. Energie potřebná ke vzniku laserového záření vzniká exotermickou chemickou reakcí. První chemický laser byl sestaven v roce 1965 a využíval reakce vodíku s chlórem. Dále se využívá k čerpání energie do aktivního prostředí chemické reakce vodíku s fluorem nebo štěpení molekul jódu UV zářením<sup>4</sup>.

Představitelé - plynové lasery - chemický laser.



## 2.3 Laser a bezpečnost<sup>15</sup>

Dle normy ČSN EN 60825 jsou laserová zařízení rozdělena do tříd podle jejich bezpečnosti.

### Třída 1

Tyto lasery jsou bezpečné pro všechny používané aplikace a podmínky. Není u nich specifikována doba vystavení vlivu záření. Jsou zde zahrnuty i vysokovýkonné lasery opatřené krytem, který odstíní záření od okolí a při otevření tohoto krytu dojde automaticky k vypnutí zařízení.

### Třída 1M

Lasery bezpečné pro všechny běžně používané aplikace. Nebezpečné jsou pouze při zesílení paprsku optickým systémem. MPE (maximální přípustná dávka ozáření) nemůže být překročena, pokud paprsek není opticky zaostřen. Při fokusaci tedy dochází ke změně třídy laseru. Třída 1M dále zahrnuje lasery, které mají celkový výkon nižší než lasery třídy 3B, ale výkon který může projít skrz oční zornici, patří do třídy 1.

### Třída 2

Tyto lasery jsou bezpečné, je-li zrak vystaven jejich záření po dobu menší než 0,25 s, což je zajištěno mrkacím reflexem. To však platí pouze pro lasery pracující na viditelné vlnové délce (400 - 700 nm). Dále jsou limitovány hodnotou výstupního výkonu 1 mW pro kontinuální režim. Potlačování mrkání zde může způsobit poškození zraku. Do této třídy patří např. laserová ukazovátka.

### Třída 2M

Lasery bezpečné z důvodu mrkacího reflexu. Platí však za podmínky, že paprsek není opticky fokusován. Patří sem lasery s velkým průřezem paprsku nebo jeho velkou rozbíhavostí. Světlo procházející oční zornicí nesmí překročit hodnotu výkonu třídy 2.

### Třída 3R

Lasery bezpečné při opatrném používání a dodržování bezpečnostních zásad. Pokud je hodnota MPE překročena, hrozí riziko poranění. Jsou zde zahrnuty lasery pracující ve viditelné vlnové délce. Při kontinuálním režimu je zde limitní hodnota 5 mW, pro pulzní režimy a neviditelné vlnové délky jsou limity jiné.

**Třída 3B**

Lasery nebezpečné při zasažení očí přímým laserovým paprskem, odraz paprsku však nebezpečný není. Patří sem lasery pracující v kontinuálním režimu s vlnovou délkou od 315 nm až do infračervené oblasti s výkonem do 0,5 W. U pulzních laserů s vlnovou délkou ve viditelném záření je limitní hodnota energie pulsu 30 mJ.

**Třída 4**

Zde jsou zahrnuty lasery s nejvyšším výkonem a energií pulsu. Paprsek způsobuje silná poranění očí, při nedodržení bezpečné vzdálenosti je nebezpečný i odraz paprsku. Kontakt s paprskem způsobuje silné pořezání a popálení pokožky. Interakce s hořlavým materiálem může vést k jeho vznícení.

**2.4 Porovnání laserových technologií**

Různé druhy laserů nabízí rozdílné výhody pro technologické aplikace. V tab. 2.2 je porovnání CO<sub>2</sub> laseru a Nd:YAG laseru při řezání rozdílných druhů materiálů.

Tab. 2.2 Pohltivost světla CO<sub>2</sub> a Nd:YAG laseru různými materiály<sup>16</sup>

Materiál	Laser	
	CO <sub>2</sub>	Nd:YAG
Uhlíková ocel	výborná	výborná
Nerez ocel	výborná	výborná
Al-slitiny	dobrá	dobrá
Měď	obtížná	obtížná
Zlato	obtížná	neřezatelné
Ti-slitiny	obtížná	dobrá
Keramika	obtížná	dobrá
Akrylát	špatná	výborná
Polyetylen	špatná	výborná
Polykarbonát	špatná	dobrá
Dřevo, překližka	špatná	výborná

Pozn.: Řezatelnost v tab. 2.2 u CO<sub>2</sub> laseru a barevných kovů je dle pracovníků z praxe upravena z hodnocení dobrá na obtížná.

## 2.5 Porovnání laseru s jinými nekonvenčními metodami řezání

Tab. 2.3 Porovnání laseru s jinými nekonvenčními procesy dělení materiálu<sup>1</sup>

Metoda	Plazma	Laser	Vodní paprsek
Dělitelné materiály	pouze kovy (vodivé materiály)	všechny, krom mat. s vysokou světelnou odrazivostí	všechny materiály
Teplota řezu	nad 1 000 °C	až 10 000 °C	do 40 °C
TOO	velká	malá	není
Kolmost řezu	silný odklon	mírný odklon	
Struktura povrchu obrobené plochy	výrazné rýhy	nízká drsnost	nízká drsnost
Výronek v řezné spáře	možno i bez výronku	většinou bez výronku	vždy bez výronku
Tvrdomost řezaného materiálu	nemá vliv na rychlost řezání		mírně ovlivňuje rychlost řezání
Velikost dílce	velké dílce	malé i velké dílce	
Tloušťka řezaného mat.	střední a velká, ocel do 40 mm	střední a malá, ocel do 25 mm	široký rozsah, ocel do 500 mm
Složitost tvaru řezu	jednoduché tvary	složitě tvary	
Průstřel	je možný		
Vznik plynných emisí	velké množství	malé množství	nevznikají
Vznik oxidických povlaků	vznikají	vznikají pouze při řezání kyslíkem	pouze u mat. korodujících při styku s vodou

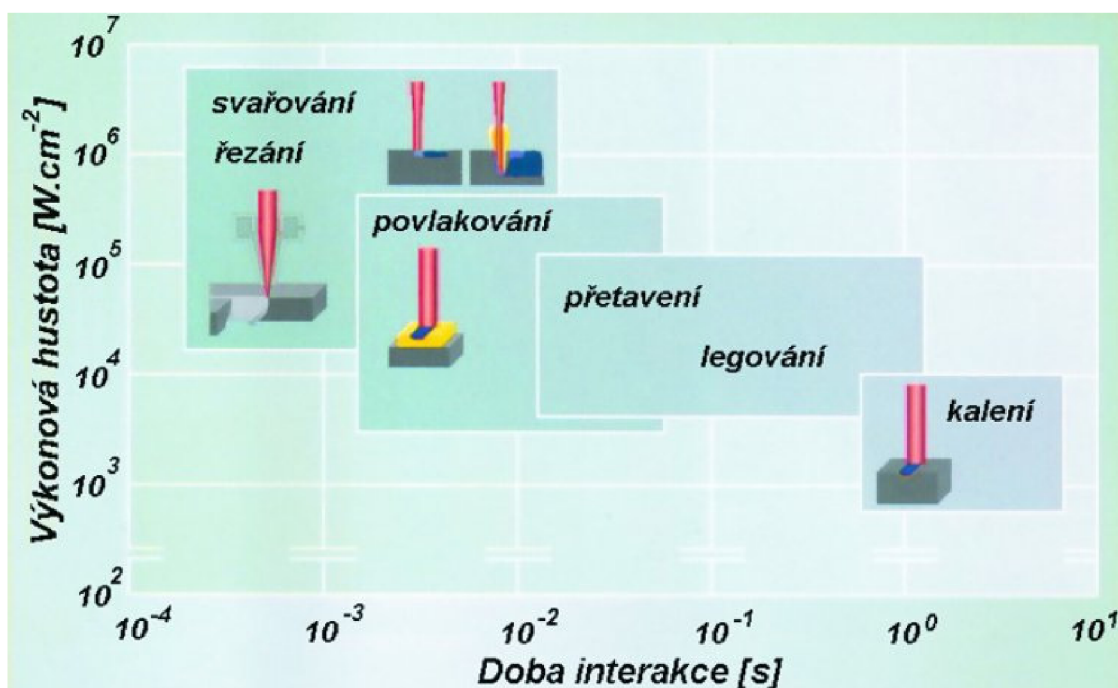
### 3 PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ LASEROVÉHO PAPRSKU

Důležitými parametry laserů pro technologické využití jsou výkon laseru a intenzita záření.

Velikost laseru není specifikována pouze velikostí pracovní plochy, ale také jeho výkonem, např. 0,5 kW - 8 kW. Laserový výkon je definován jako energie emitovaná formou laserového záření za jednotku času.

Další parametr důležitý pro provoz a nasazení laseru do konkrétní technologie je intenzita záření neboli výkonová hustota. Ta je definována jako výkon dopadající na plochu, na kterou je paprsek zaostřen. Vysoké intenzity může být dosaženo v pulzním i kontinuálním režimu provozu.

Tyto parametry ovlivňují hodnoty, jako jsou např. hloubka průniku paprsku nebo řezná či svařovací rychlost. Určují také možné technologické využití (obr. 3.1) laserového zařízení<sup>13</sup>.



Obr. 3.1 Pracovní parametry laseru<sup>6</sup>

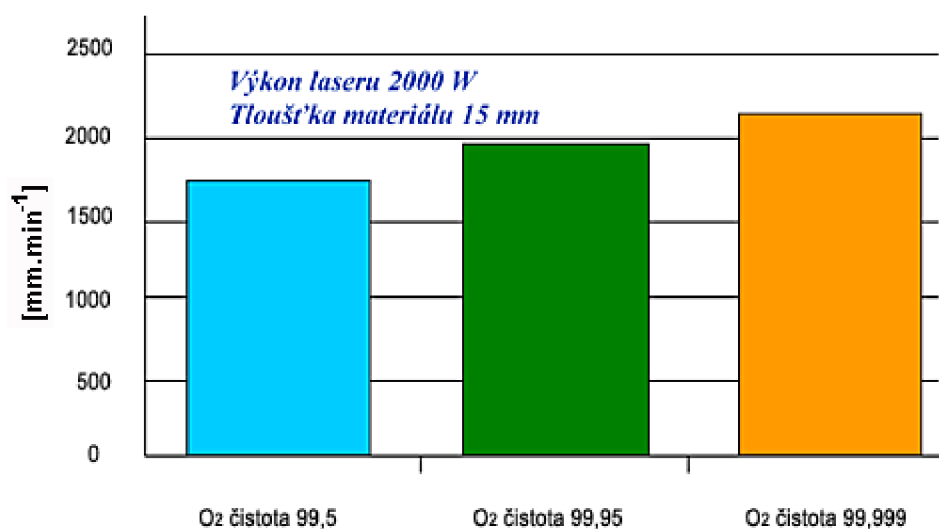
### 3.1 Technické plyny pro laser

Technické plyny používané pro provoz laserových zařízení se dělí na dvě základní skupiny - rezonátorové plyny a asistenční plyny.

#### Čistota plynů

Pro provoz plynových laserů je třeba užívat jen vysoce čisté rezonátorové plyny. Už nízký podíl nečistot může způsobit nižší spolehlivost, životnost a výkon laseru. Nejškodlivější příměsi jsou vodní vlhkost a uhlovodíky. Proto se používají rezonátorové plyny s minimální čistotou danou výrobcem laserového zařízení.

Čistota plynů je však důležitý parametr i pro asistenční plyny. Zde nečistoty a příměsi jiných plynů mohou ovlivnit parametry technologického procesu<sup>17,18</sup>.



Obr. 3.2 Vliv čistoty kyslíku na rychlost řezání konstrukční oceli laserem<sup>17</sup>

Značení čistoty plynů se udává dvěma čísly. První číslo značí počet devítek v procentuální hodnotě, druhé číslo odpovídá hodnotě na posledním desetinném místě. Např. kyslík o čistotě 3.5 obsahuje 99,95 % O<sub>2</sub>.

Tab. 3.1 Čistota technických plynů pro laser<sup>17</sup>

	Médium	Čistota
Rezonátorový plyn	CO <sub>2</sub>	4.5
	N <sub>2</sub>	5.2
	He	4.6
Asistenční plyn	O <sub>2</sub>	2.5 - 3.5
	N <sub>2</sub>	4.8 - 5.2
	Ar	4.8 - 5.0
	He	4.6

### 3.1.1 Rezonátorové plyny

Rezonátorové plyny se používají u laserů s plynovým aktivním prostředím. Nejběžnějšího představitele představuje CO<sub>2</sub> laser. Jeho aktivní prostředí tvoří směs plynů CO<sub>2</sub> (3 - 10 %), N<sub>2</sub> (< 10 %) a He (80 %). Nejvíce obsažené helium má dobrou tepelnou vodivost a slouží zde jako médium pro odvod tepla. Tyto plyny se dodávají k laserům se směšovacími přístroji zvláště v samostatných tlakových lahvích. K laserům bez směšovacího zařízení je nutno dodávat plynovou směs již namíchanou v jedné tlakové lahvi<sup>18</sup>.

### 3.1.2 Asistenční plyny

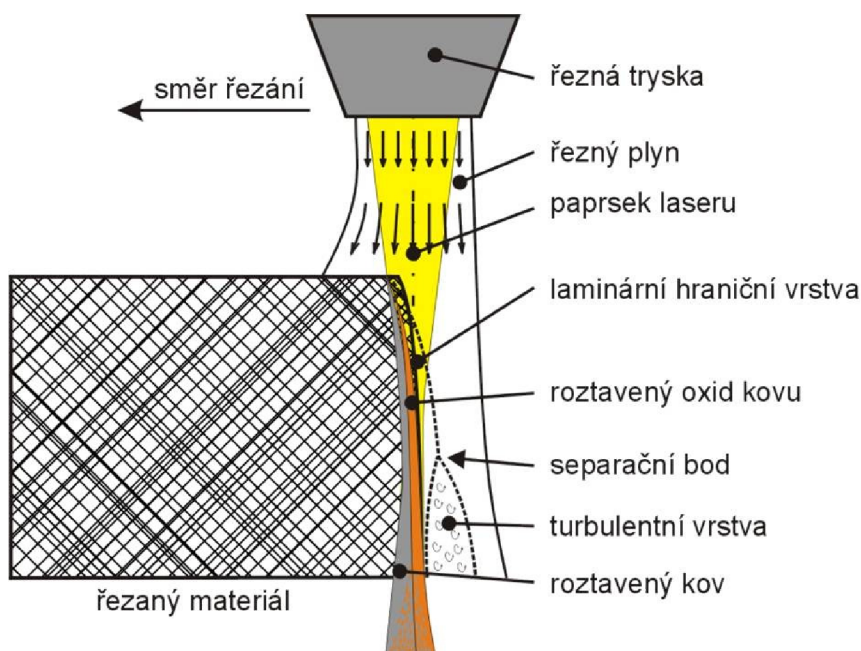
Tyto plyny mají při využití laserové technologie několik funkcí. Inertní plyny mají význam jako ochrana zpracovávaného materiálu před okolní atmosférou a také vyfukují roztavený kov z řezné spáry. Kyslík plní funkci oxidační reakce pro podporu spalování při oxidačním řezání laserem. Další funkcí je také ochrana optiky před rozstříkujícím kovem z pracovního místa.

Tab. 3.2 Doporučené asistenční plyny pro řezání CO<sub>2</sub> laserem<sup>17</sup>

Médium	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	vzduch
Použití	konstrukční oceli	korozivzdorné oceli, barevné kovy, nekovové mat.	reaktivní materiály (Ti,...)	konstrukční oceli, (nižší kvalita řezu)

### 3.2 Řezání laserem

Při řezání je laserový paprsek s vysokou hustotou energie zaostřen do ohniska a ve spáře děleného materiálu dochází k tavení až sublimaci. Existuje několik metod dělení materiálu laserem, které jsou dány druhem řezného plynu.



Obr. 3.3 Schéma řezání laserem<sup>19</sup>

#### 3.2.1 Tavné řezání

Řezaný materiál se lokálně nataví a je z řezné spáry vyfukován inertním plynem. Základní materiál je nataven pouze z energie laserového paprsku, což v porovnání s oxidačním řezáním limituje řeznou rychlost. Tento způsob se používá zejména k vytváření kvalitních a nezoxidovaných řezů např. nerezových ocelí a barevných kovů. Při použití dusíku o vysoké čistotě jako inertního plynu dosáhneme v místě řezu kvalitního, lesklého povrchu řezných ploch, které nevyžadují následující dokončovací úpravy<sup>15,20</sup>.

#### 3.2.2 Oxidační řezání

Zde pracovní plyn není inertní, ale je v něm obsažen i kyslík. Natavený kov je také z řezné spáry vyfukován, ale zároveň částečně shoří v proudu kyslíku. Tato exotermická reakce dodává další energii do místa řezu, což zvyšuje účinnost řezného procesu. Řezná spára je širší a s nižší kvalitou povrchu. Metoda vhodná pro dělení konstrukčních uhlíkových ocelí do tloušťky 25 mm<sup>15,20</sup>.

### 3.2.3 Sublimační řezání

Materiál se působením vysoce koncentrované energie laserového paprsku z místa řezu odpařuje. Přiváděný inertní plyn odvádí vzniklé páry. Nevýhodou je vysoká požadovaná energie pro odpaření měrného objemu materiálu. Vzniká kvalitní úzký řez. U materiálů s tekutou fází je možno řezat maximální tloušťku přibližně rovnající se průměru paprsku. Při jejím překročení mohou páry kovu zkondenzovat a vytvořit svarový spoj. Proto je metoda vhodná pro tenké kovové fólie a nekovové materiály<sup>15,20</sup>.

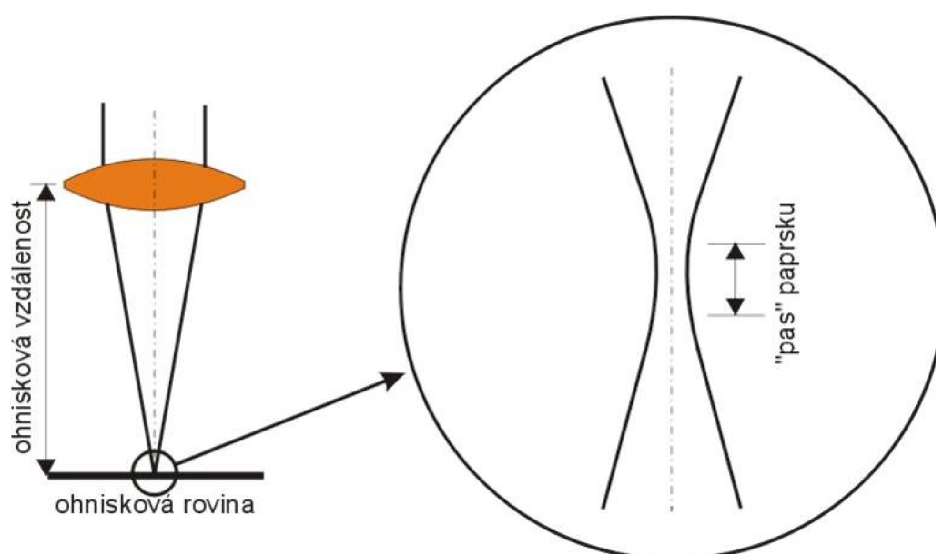
### 3.2.4 Řezání s podporou vzduchu

Je to kombinace tavného a oxidačního řezání. Vzduch je tvořen přibližně 78 % dusíku, 21 % kyslíku a dalšími plyny. Výhodou jsou především nízké náklady na zpracování a použití vzduchu jako asistenčního média, mezi nevýhody patří dosažení nižší kvality řezu a další omezení v síle řezaného materiálu.

### 3.2.5 Kvalita řezu

Nevýhodou metody řezání materiálů laserem je, že se může výrazně projevit charakter rozložení energie v laserovém paprsku na kvalitu a výkon řezání. Proto je třeba věnovat velkou pozornost symetrii paprsku.

Tato nevýhoda je patrná zejména při řezání materiálů o větších tloušťkách (oceli do 25 mm). Tento problém může být ještě výraznější při změnách směru řezání a zejména při využití pracovních parametrů laseru až na hraně možnosti<sup>12</sup>.



Obr. 3.4 Tvar laserového paprsku v místě řezu<sup>19</sup>



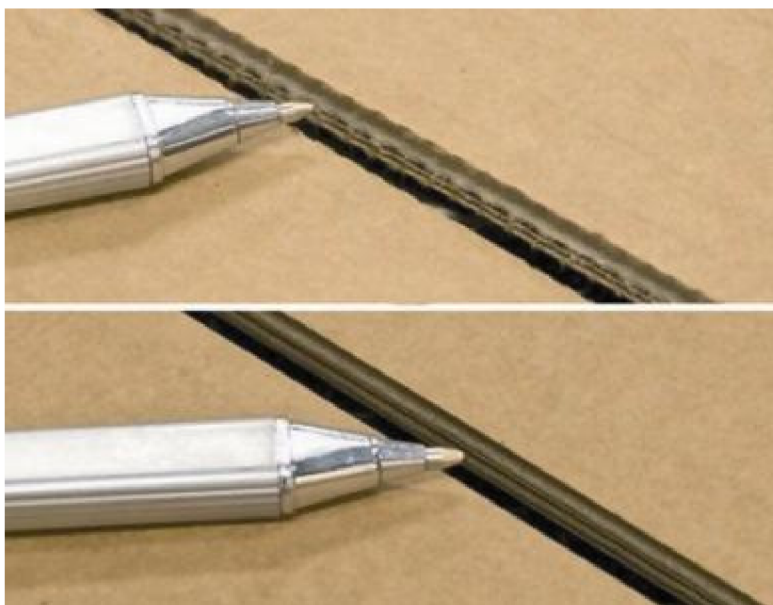
I přes tyto vlastnosti laserového paprsku dává laserová technologie nejkvalitnější povrch řezné hrany ze všech metod tepelného dělení materiálu. Na menších tloušťkách je řez téměř kolmý, při tloušťce kolem 10 mm je úkos do 1 stupně<sup>21</sup>.

**Výhody laserového řezání** - vysoká produktivita, přesnost a kvalita řezu,  
- možnost řezat složité tvary,  
- malá tepelně ovlivněná oblast,  
- malý prořez (úzká řezná spára),  
- minimální požadavky na upínání materiálu, ...

**Nevýhody laserového řezání** - vysoké pořizovací náklady,  
- omezení tloušťky a druhu materiálu,  
- může dojít k opálení řezné hrany, ...

### 3.2.6 Řezání nekovových materiálů

Pro řezání nekovových materiálů jsou stále velmi aktuální CO<sub>2</sub> lasery s vlnovou délkou 10,6 μm. Náhrada za pevnolátkové lasery s vlnovou délkou 1,06 μm není pro řezání některých materiálů možná. Například skrze materiály jako plexisklo laserový svazek o této vlnové délce prochází, aniž by došlo k jeho interakci s materiálem<sup>22</sup>.



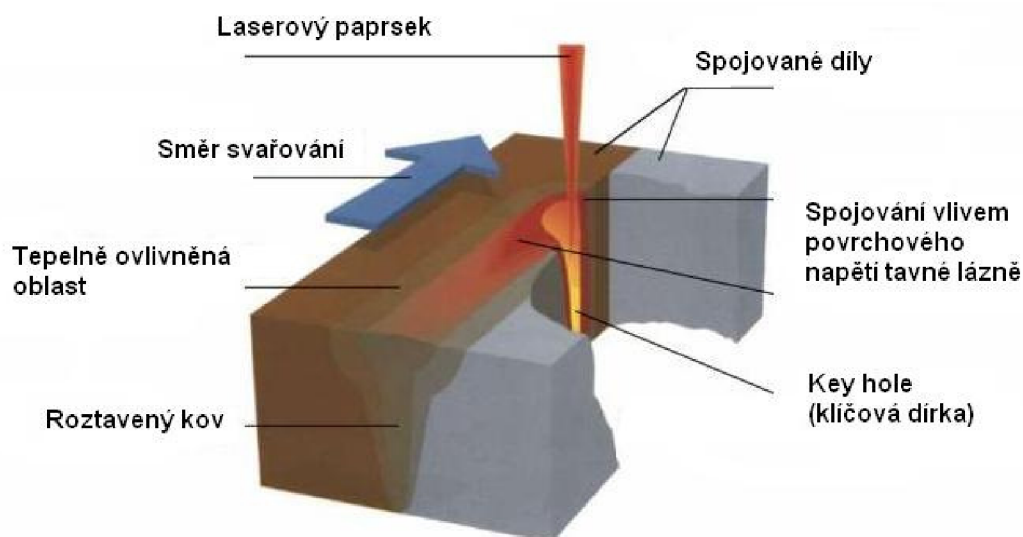
Obr. 3.5 Porovnání řezu kartonu pomocí oscilačního nože (nahore) a laseru<sup>22</sup>

Výhodou řezání nekovových materiálů laserem je zlepšení kvality řezu (obr. 3.4) a vysoká produktivita. Nevýhodou může být nutnost odsávání karcinogenních par při řezání některých druhů materiálů, nutnost použití taktilní detekce u nevodivých materiálů a vysoké pořizovací náklady stroje.

### 3.3 Svařování laserem

Při svařování je laserový paprsek zaostřen do ohniska, kde vlivem vysoké koncentrace energie dochází k tavení svařovaných materiálů. Hlavními výhodami laserového svařování jsou vysoká rychlost procesu, malé vnesené teplo a odlišná geometrie spoje v porovnání s běžnými metodami svařování. Vzniká efekt „Key hole“ což má za následek, že paprsek proniká hluboko do materiálu, svary jsou hluboké, úzké a s minimální tepelně ovlivněnou oblastí. Navíc ani při větších tloušťkách svařování není třeba používat přídavný materiál.

Pro svařování se často používají Nd:YAG a CO<sub>2</sub> lasery. Ve srovnání s ostatními aplikacemi vyžaduje svařování menší intenzitu záření a větší délku generovaného pulzu<sup>20,23,24</sup>.



Obr. 3.6 Princip laserového svařování<sup>24</sup>

Svařovat lze většinu materiálů svařitelných běžnými metodami, a také některé materiály, které jsou konvenčními metodami svařitelné jen problematicky. Vhodné materiály pro svařování laserem jsou nerezavějící oceli i méně používané materiály, jako titanové, zirkonové a chromniklové slitiny.

Pro kovy s vysokou odrazivostí povrchu vůči vlnové délce paprsku CO<sub>2</sub> laserů, jako je hliník nebo měď, je možno nasadit technologie s Nd:YAG laserem<sup>24</sup>.

### **3.4 Další využití laserového paprsku**

Krom řezání a svařování pomocí laserového paprsku existuje ještě několik dalších oblastí využití v technických aplikacích. Některé důležité jsou v této podkapitole rozepsány, jiné jen jmenovitě zmíněny.

#### **3.4.1 Vrtání laserem**

Vrtání laserem funguje na principu odpařování materiálu vlivem vysoké intenzity paprsku. Ta musí být větší než u svařování, proto se pro tuto technologii používá pulzních laserů s délkou pulzu menší než 1 ms. Ze zkušeností vyplývá, že kvalitnější otvory vznikají při použití krátkých pulzů. Vrtání lze provádět jednotlivými pulzy, opakovanými pulzy či vyřezáváním díry při pohybu paprsku po požadované trajektorii. Hloubka vrtané díry může být až 50 mm, nejmenší průměr až 0,025 mm. Výhodou je velká dynamika procesu.

Vrtat lze kovy, plasty, textilie, keramiku atd. Technologie se používá pro vrtání otvorů do vstřikovacích trysek, kamenů do hodiněk, lopatek proudových motorů apod. Používají se CO<sub>2</sub> lasery, Nd:YAG lasery, excimerové lasery a další<sup>23</sup>.

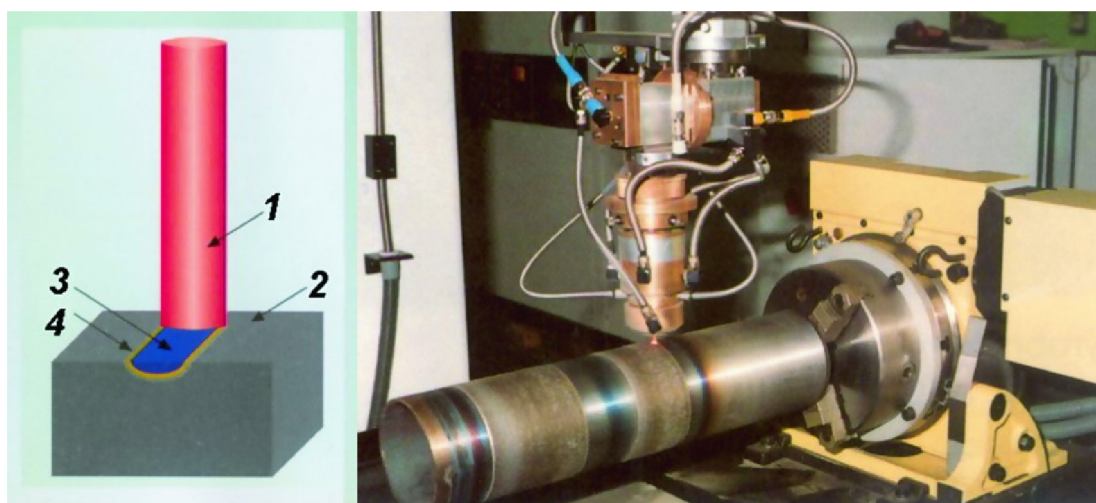
#### **3.4.2 Značení a gravírování laserem**

Principem je vytvářet na povrchu značené součásti mechanicky odolný a kontrastní popis bez použití chemických složek či barev odpařením části materiálu. Označovat se dá téměř jakýkoli kovový i nekovový materiál. Nastavením parametrů laseru lze plynule měnit hloubku značení od několika tisícín milimetru až po gravírování v milimetrech. Pro tyto operace se používají CO<sub>2</sub> lasery, Nd:YAG, excimerové, vláknové lasery a další<sup>10</sup>.

#### **3.4.3 Tepelné zpracování laserem**

Pro tepelné zpracování laserem je typická krátká doba ohřevu a malý objem ohřátého materiálu. Lze provádět operace kalení, žíhání, popouštění, tepelné zpevnění s natavením povrchu atd.

Oproti konvenčním metodám tepelného zpracování je zde možnost zpracovat materiál pouze v místě potřeby, a to i pokud je těžko přístupné<sup>23</sup>.



Obr. 3.7 Schéma kalení laserem, kalení hřídele laserem<sup>23</sup>

1- paprsek laseru, 2 - tepelně neovlivněný povrch, 3 - zakalený materiál,  
4 - tepelně ovlivněná oblast

**Další aplikace využívající laser** - nanášení povlaků laserem,

- dekorace skla laserem,
- texturování povrchů laserem,
- leštění povrchů,
- kombinace laseru a obráběcího stroje,
- zaměřování a měření vzdálenosti,
- medicína, optika, přenos dat, ...

## 4 TYPOVÉ PŘEDSTAVITELE VHODNÝCH DÍLŮ

Vhodné typové představitelé dílů pro řezání laserem lze rozdělit do několika skupin z hlediska: materiálu, tvaru a sériovosti vyráběných součástí. Laserem vyřezané součásti mohou být, ale často nebývají, finálními výrobky. V této kapitole jsou zmíněna kritéria především pro oceli.

### 4.1 Parametry materiálu

U materiálů pro laserové řezání se posuzují zcela jiné vlastnosti než pro konvenční metody obrábění. Pojem obrobiteľnost v původním smyslu ztrácí význam. Laserovým paprskem lze dělit měkké materiály, jako jsou například textilie, papír či plastické hmoty, ale i tvrdé a těžko obrobiteľné materiály jako ocel, kalená ocel, titanové slitiny, slinuté karbidy a další. Proto je třeba se zde zaměřit na parametry materiálu, které ovlivňují možnosti jeho obrábění, a to především řezání laserem.

#### **Vlastnosti materiálu ovlivňující proces řezání laserem<sup>1, 20</sup>**

Odrazivost materiálu - je dána poměrem množství odražené vůči dopadající energii. Je rozhodující pro volbu vlnové délky laserového paprsku, tudíž i typ laseru.

Pohltivost materiálu - schopnost pohlcovat světelnou energii paprsku a měnit ji na kinetickou energii neuspořádaného pohybu molekul nebo atomů absorbující látky (na tepelnou energii). Je to převrácená hodnota odrazivosti materiálu.

Tepelná vodivost - udává schopnost či rychlost šíření tepelné energie materiálem. Při řezání laserem ovlivňuje velikost tepelně ovlivněné oblasti.

Tepelná kapacita - schopnost materiálu ukládat teplo. Udává množství tepelné energie, které je vloženo do materiálu.

Teplota tání - teplota, při které látky přechází ze skupenství pevného do kapalného. Při řezání laserem s podporou dusíku je materiál roztaven a vyfouknut mimo řeznou spáru.

Teplota sublimace - při této teplotě dochází k přeměně pevného skupenství látky na plynné. Při sublimačním řezání laserem je materiál odpařován z místa řezu vlivem vysoké koncentrace energie paprsku.

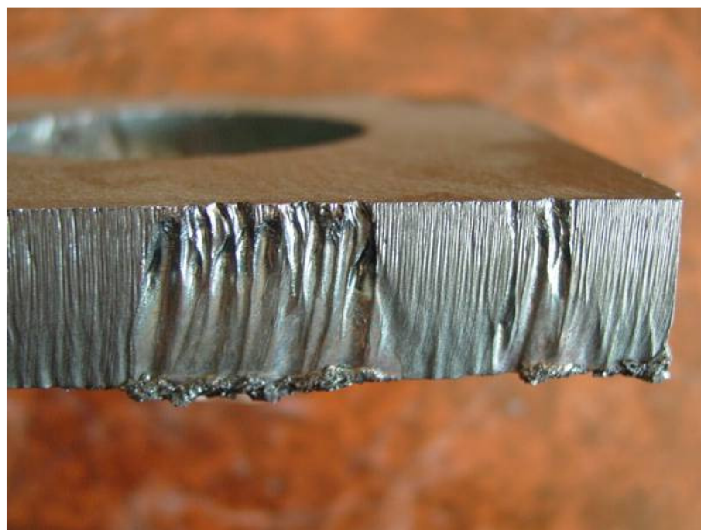
Elektrický odpor materiálu - schopnost materiálu vést elektrický proud. Nastavení vzdálenosti laserové hlavy od materiálu pomocí hodnoty el. odporu.

Vhodnost materiálu k řezání laserem určuje především odrazivost, pohltivost a tepelná vodivost materiálu. Obrobitelnost je tím větší, čím je větší pohltivost materiálu a menší odrazivost a tepelná vodivost.

**Kvalita materiálu**<sup>21</sup> - také ovlivňuje proces laserového řezání. V následujícím textu je dále rozveden vliv kvality ocelí.

Chemické složení - při řezání ocelí laserem je vhodné používat materiály se známým a přesně daným chemickým složením. Problematický je při řezání vyšší obsah křemíku a uhlíku.

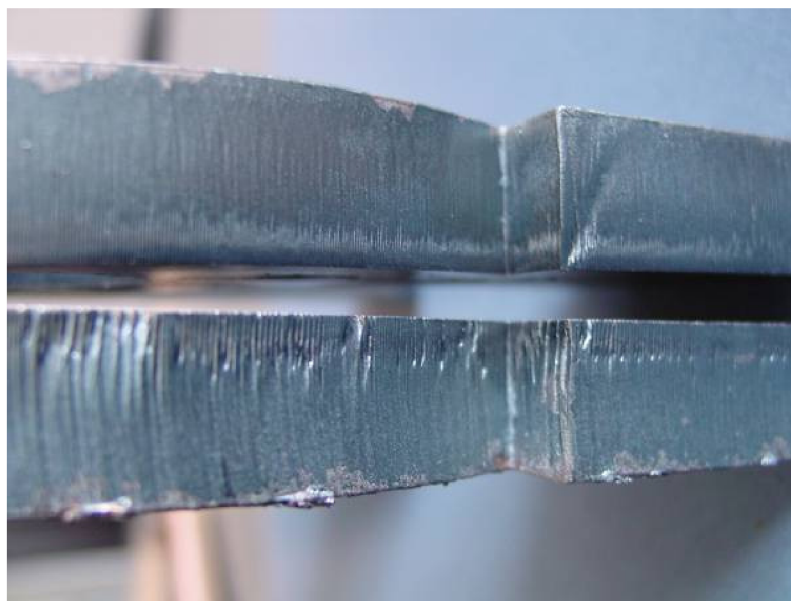
Homogenita materiálu - nehomogenní složení a vady v materiálu jako jsou vměstky nebo bubliny komplikují nebo znemožňují řezání.



Obr. 4.1 Povrch laserového řezu na nekvalitním materiálu<sup>21</sup>

Kvalita povrchu materiálu - rez, okuje nebo i barva či další překážky na povrchu řezaného materiálu ztěžují či znemožňují řezání laserem.

V případě potřeby kvalitnějších řezů je možné použít oceli zvláště vhodné pro metodu laserového řezání. Jejich vyšší cena je kompenzována lepší kvalitou řezu a rychlejším řezáním. Např. oceli Raex, SAEY-LaserFORM, Domex, ...<sup>21</sup>



Obr. 4.2 Porovnání kvality řezu oceli Raex (nahore) a běžné oceli<sup>21</sup>

## 4.2 Tvar součástí

Laserem lze řezat jednoduché i tvarově složité součásti, a to jak ve 2D, tak i ve 3D. V rovině jsou to součásti vyřezané do plechu o tloušťce až 25 mm u konstrukčních ocelí. V prostoru je možno řezat různé profily a trubky. Tvar součásti, zejména pak počet otvorů, ovlivňuje také množství potřebných vpichů do materiálu.

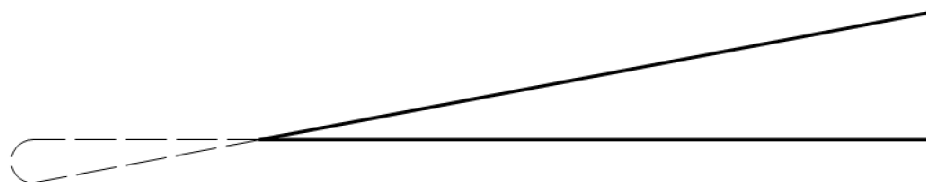
### Ploché součásti

Do plechových polotovarů je možno řezat i velmi složité tvary. Problém může nastat při řezání ostrých rohů nebo špiček, kdy hrozí riziko, že vnesené teplo paprsku může upálit tuto malou část materiálu (špičku, ostrý roh). To platí především pro větší tloušťky materiálu, kdy rezná rychlost není příliš velká a je zde vyšší podíl vneseného tepla do materiálu, zvyšuje se tak i tepelně ovlivněná oblast. Dalším limitujícím kritériem je hustota řezů v materiálu, a to také z důvodu vnesení většího množství tepla a následného rizika deformací plechu nebo i samotných součástí. Platí opět zejména pro silnější materiály.

Tyto problémy lze řešit řezáním kontury výrobku v několika krocích, obkrožným řezáním součástí na plechu, nebo úpravou dráhy paprsku při řezání ostrých rohů přidáním pomocných drah.

Také je možno využít společný řez pro více součástí. Jeho výhodou je úspora materiálu a strojního času, čímž je dosaženo snížení nákladů na

výrobu. Používá se při řezání symetrických součástí a u dílů, kde není třeba dodržet nejvyšší přesnost (díly pro svařované konstrukce, ...).



- Obrys součásti
- - - Dráha pomocného řezu

Obr. 4.3 Pomocná dráha řezu

Také velikost součástí je třeba zohlednit při výrobě dílů z plechu laserovou technologií. Maximální velikost dílů je dána výkonem laseru a také velikostí jeho pracovního prostoru. Běžně je možno řezat díly z tabule plechu o velikosti 3000 x 1500 mm a síle až 25 mm pro konstrukční oceli. Naopak je možno řezat i miniaturní součásti (obr. 4.3). U takto malých součástí, kde hrozí nebezpečí propadnutí dílů do roštu pracovního stolu, je vhodné použití mikromůstků. Součásti tak díky nim zůstanou připevněny k plechu a po dokončení řezání se díly vylomí. Při nežádoucím propadání součástí do roštu stolu může hrozit zaklínění dílu mezi desky roštu, tyto díly pak představují velké riziko poškození pro laserovou hlavici, která operuje jen v malé vzdálenosti nad plechem.



Obr. 4.4 Příklad možností laserového řezání malých součástí z plechu, použití mikromůstků<sup>21</sup>



### Součásti z profilů a trubek

Jednou z nejmodernějších aplikací laserového řezání je výroba součástí z profilů a trubek. Jedná se zejména o tenkostěnné profily, u nichž nehrozí v takové míře natavení a tepelné ovlivnění oblasti řezu. Rozměry profilů možných laserově obrábět se pohybují v rozsahu vnějšího obalového průměru 20 - 400 mm a délky profilu až několik metrů (např. 8 m). Maximální síla stěny profilu je dána obecnými možnostmi laserového řezání, tzn. až 25 mm pro konstrukční oceli.

Stroje pro řezání profilů jsou 3D laserová centra vybavená rotační hlavou s automatickým posuvem materiálu a CNC řízením.

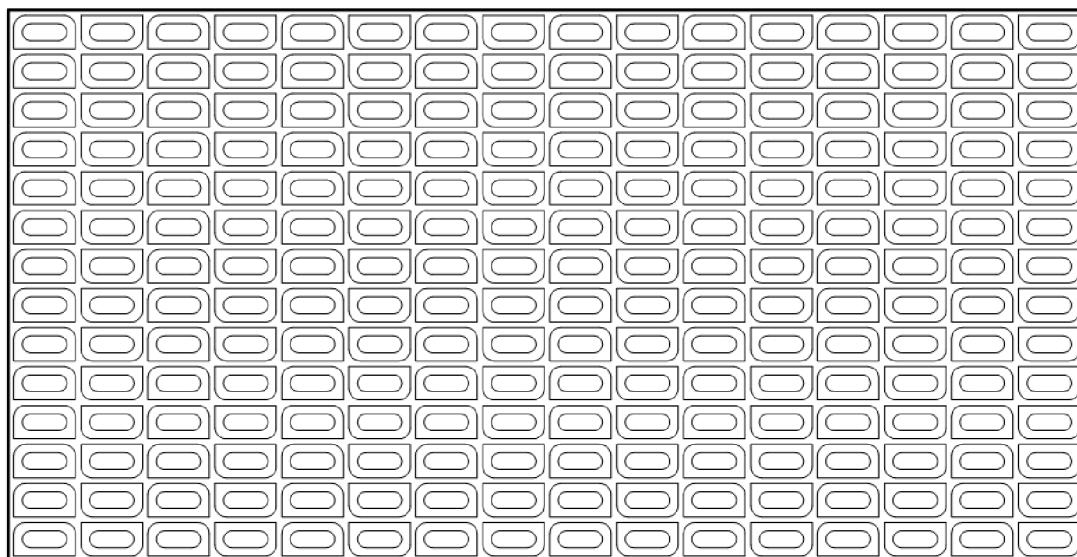


Obr. 4.5 Součásti vyřezané z tvarových profilů<sup>25</sup>

### 4.3 Sériovost výroby

Řezání laserem patří k velmi produktivní výrobní technologii. Proto je vhodnější vyrábět výrobní série střední až větší. Při výrobě kusového počtu součástí se do koncové ceny výrobku negativně projeví čas, při kterém stroj nepracuje a je např. vyměňován polotovár (plech). Z hlediska ekonomického provozu je vhodné vyrábět počet výrobků alespoň na jednu tabuli plechu (obr. 4.6).

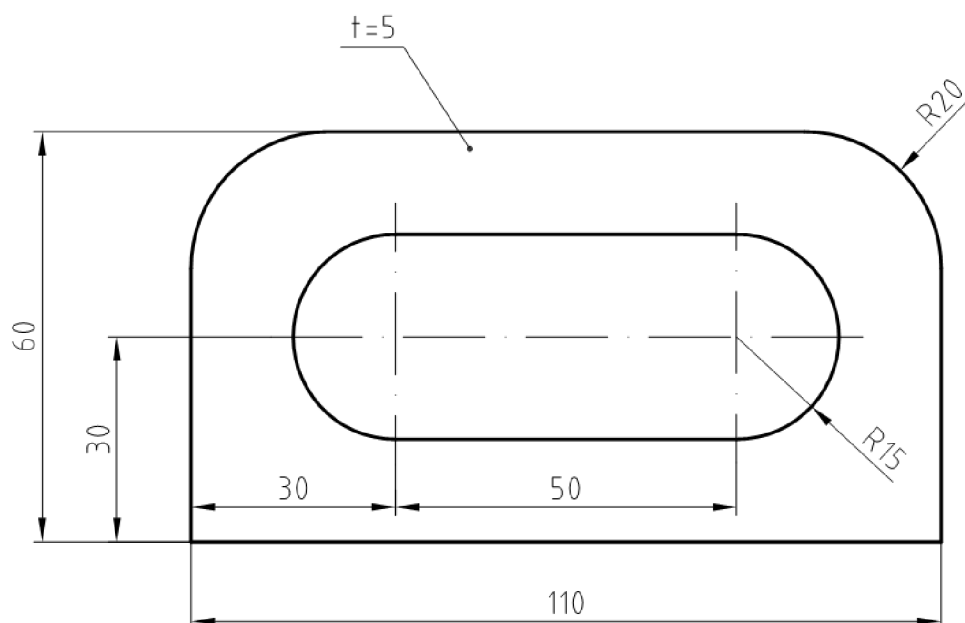
Zkušební vzorek se vyráběl pouze v počtu 5 ks, ale řezný plán byl zpracován i pro celou tabuli plechu o rozměru 2000 x 1000 mm, na které bylo umístěno 224 výrobků. Náklady na výrobu součásti při různém počtu kusů ve výrobní sérii viz kapitola 7: Technicko-ekonomické vyhodnocení.



Obr. 4.6 Řezný plán tabule plechu 2000 x 1000 mm

#### 4.4 Vlastní zkušební součást

Na obr. 4.6 je znázorněna vlastní zkušební součást, která je vyřezána na CO<sub>2</sub> laseru Bystronic Bystar 3015 ve firmě Technologické centrum, a. s. Jednoduchý tvar a malé rozměry součásti byly voleny s ohledem na cenu výrobku. Účelem výroby vzorku je seznámení se s vlastní výrobou v podniku a zejména s technickou přípravou výroby konkrétního dílu včetně stanovení jeho ceny.



Obr. 4.7 Tvar a rozměry vyráběné součásti



Obr. 4.8 Foto vyrobeného vzorku

Tab. 4.1 Chemické složení oceli vzorku

Značení oceli		Chemické složení - max. %			
ČSN	EN	C	N	P	S
11 373	S 235 JRG	0,17	0,007	0,045	0,045

## 5 TPV LASEROVÉHO PRACOVIŠTĚ

Technická příprava výroby (TPV) je definována jako soubor činností pro přípravu a zpracování konstrukční, technologické a projektové dokumentace<sup>26</sup>.

Rozdělení TPV<sup>26</sup> - technologická příprava výroby (TgPV),

- konstrukční příprava výroby (KPV),

- projektová příprava výroby (PPV).

Hlavní části TPV tvoří konstrukční a technologická příprava výroby. Ty zejména ovlivňují úroveň výrobku a technicko-organizační úroveň výrobních systémů<sup>26</sup>.

### **Konstrukční příprava výroby**

Pod tímto pojmem se rozumí činnosti zaměřené na konstruování nových, nebo modernizovaných výrobků. Důležitá je funkčnost, konstrukční jednoduchost, provozní hospodárnost a v neposlední řadě i estetičnost finálního produktu.

### **Technologická příprava výroby**

Náplní práce TgPV je zpracování výrobní dokumentace a podkladů pro zajištění materiálního vybavení výrobního procesu stroji, nástroji, nářadím a přípravky. Výrobní dokumentace také obsahuje informace o volbě polotovarů, pořadí a počtu operací, pracovních podmínkách, technicko-ekonomickém zhodnocení a další.

### **Projektová příprava výroby**

PPV řeší otázky časových a prostorových nároků pro technologické, manipulační, kontrolní a jiné činnosti.

Důležitá je spolupráce těchto celků, jejich vzájemná kontrola a zpětná vazba.

## 5.1 Firma Technologické centrum, a. s.

Firma působí na trhu od roku 1995. Poskytuje služby zakázkové výroby v oblastech řezání laserem, ohýbání dílů z plechu a jejich svařování. Nabízí tak služby kompletní výrobní linky pro zhotovování hotových celků z plechu.

### 5.1.1 Nabízené služby<sup>3</sup>

**Technologie dělení materiálu laserem** - laserové pracoviště je vybaveno celkem čtyřmi CO<sub>2</sub> lasery od výrobců Bystronic a TRUMPF.

Pracovní parametry pracoviště:

- max. výkon: 5 kW,
- max. rozměr tabule: 3000 x 1500 mm,
- max. řezaná tloušťka nerez oceli: 20 mm,
- max. řezaná tloušťka konstrukční oceli: 20 mm,
- max. řezaná tloušťka Al slitin: 10 mm.

**Ohýbání plechů** pomocí ohraňovacích lisů - firma disponuje celkem čtyřmi ohraňovacími lisy od výrobců TRUMPF a Safan.

Pracovní parametry pracoviště:

- max. síla: 170 kN,
- max. délka ohybu: 3 m,
- max. tloušťka materiálu pro ohyb: 12 mm.

**Svařování součástí** metodami MIG a MAG, svařování nerezových ocelí metodou TIG, bodové svařování. Pracoviště je vybaveno jeřábem o max. nosnosti 500 kg.

**Zámečnické operace** nabízené pro komplexnější možnosti výroby:

- vrtání, zahlubování, řezání závitů,
- nýtování,
- omílání,
- montáž.

## 5.2 TPV ve firmě Technologické centrum, a. s.

TPV ve firmě Technologické centrum, a. s. je složena z úseků konstrukčního, technologického a technicko-ekonomického.

### 5.2.1 Konstrukční příprava výroby

KPV zde není přímo určena k návrhu a vývoji nových součástí, spíše plní úkol technického poradenství pro zákazníky. Cílem je navrhnout, nebo upravit konstrukční provedení s ohledem na funkčnost výrobku, výrobní možnosti firmy a cenu součástí. Toto konstrukční provedení je poté konzultováno se zákazníkem a na závěr předáno do technologického úseku.

Pro konstruování je používán 3D modelovací program Solid Works, informační data je možno přijímat ve formátech s příponami IGES, DXF a DWG popřípadě i v tištěné podobě či jiných dostupných formátech.

### 5.2.2 Technologická příprava výroby

Základní data, se kterými technolog pracuje, pochází z konstrukčního úseku. Jsou ve formátu výkresu, nebo modelu součásti a týkají se především tvaru a materiálu dílu. Hlavní náplní práce technologa pak je tvorba programu s vytvořením rezného plánu pro výrobu zadaných součástí. Vše za podmínek maximální produktivity a jakosti výroby.

Programování je realizováno v softwarech v závislosti na použitých strojích. Pro stroje značky Bystronic je to systém Bysoft, stroje TRUMPF jsou programovány v softwaru TruTops. Níže jsou popsány kroky programování pomocí Bysoft.

**Systém Bysoft<sup>27</sup>** obsahuje řadu několika programů pro operace řezání a ohýbání a je optimalizován pro stroje Bystronic.

Software pro plošné obrábění:

- Bypart - konstruování dílů ve 2D,
- Bywork - tvorba rezných programů,
- Bytrace - vektorizace obrázků.

Software pro obrábění profilů a trubek:

- Bytubepart - konstruování trubek a profilů,
- Bytubework - tvorba rezných programů pro řezání profilů a trubek.

Software pro ohýbání:

- Bybendpart - programování ohýbaných dílů.

### **Programování, tvorba řezného plánu**

Vyráběné součásti je možno nakreslit v aplikaci Bypart, nebo použít již hotový díl ve formátu DXF.

Soubor s výkresem se načte do aplikace Bywork, ve které se tvoří řezné programy.

#### **Postup programování**

- volba technologie: řezání nebo gravírování,
- používaný asistenční plyn: kyslík, dusík, vzduch,
- stranová korekce: vnější, vnitřní obrys výrobku,
- zadání rozměrové korekce: např. pro řezání větších tloušťek materiálu,
- volba druhu vpichu: normální nebo pulzní,
- vytvoření mikromůstků: pro malé součásti,
- nájezd paprsku k součásti: po přímce nebo tečně,
- výjezd paprsku od součásti: po přímce nebo tečně,
- trajektorie pohybu řezné hlavy: automaticky nebo ručně,
- volba velikosti plechu: malý, střední, velký, nestandardních rozměrů,
- řezný plán: lze volit automaticky nebo ručně,
- směr řezání dílů na tabuli: zleva, zprava, postupně, obkročně,
- odříznutí zbytku tabule od části odpadu,
- simulace: kontrola řezných drah.

Na závěr programování jsou vygenerována statistická data s informacemi, jako jsou: čas řezu, počet vpichů, délka řezu, a to vztahující se k jedné součásti nebo k celé tabuli plechu.

Následuje zaslání programu na server, odkud je přístupný i pro ostatní pracoviště (výrobní pracoviště - stroj, technicko-ekonomické pracoviště), která z něho využívají data.

#### **5.2.3 Technicko-ekonomický úsek**

Ve společnosti Technologické centrum, a. s. je tento úsek spojen s KPV. Krom technického poradenství je v něm řešena i koncová cena výrobku a pracovní harmonogram jednotlivých strojů, to vše na základě potřebných dat z TgPV. Dalším úkolem tohoto úseku je zálohování dat do databáze výkresů a objednávek, což je užitečné například pro opakovanou výrobu jednou již zhotovených zakázek či dílů.

Výstupem je zakázkový list, který obsahuje všechny potřebné informace pro výrobu součástí.

### 5.3 Výrobní úsek laserového pracoviště

Pracovník výroby obdrží zakázkový list, ve kterém jsou uvedena vstupní data potřebná k výrobě součástí. Po zajištění potřebného materiálu nahraje z interní sítě do stroje potřebný program. Poté zkontroluje, popřípadě zadá, podmínky řezu a přejde k výrobě první součásti. U první součásti je třeba zkontrolovat tvar a tolerance dílu a vzhled řezné plochy. V případě nesrovnalostí s výkresovou dokumentací, nebo špatné jakosti řezu provede korekci programu, nebo úpravu řezných parametrů přímo na stroji. Při závažných neshodách dojde k přepracování zpět v TPV.



Obr. 5.1 Výroba vzorků



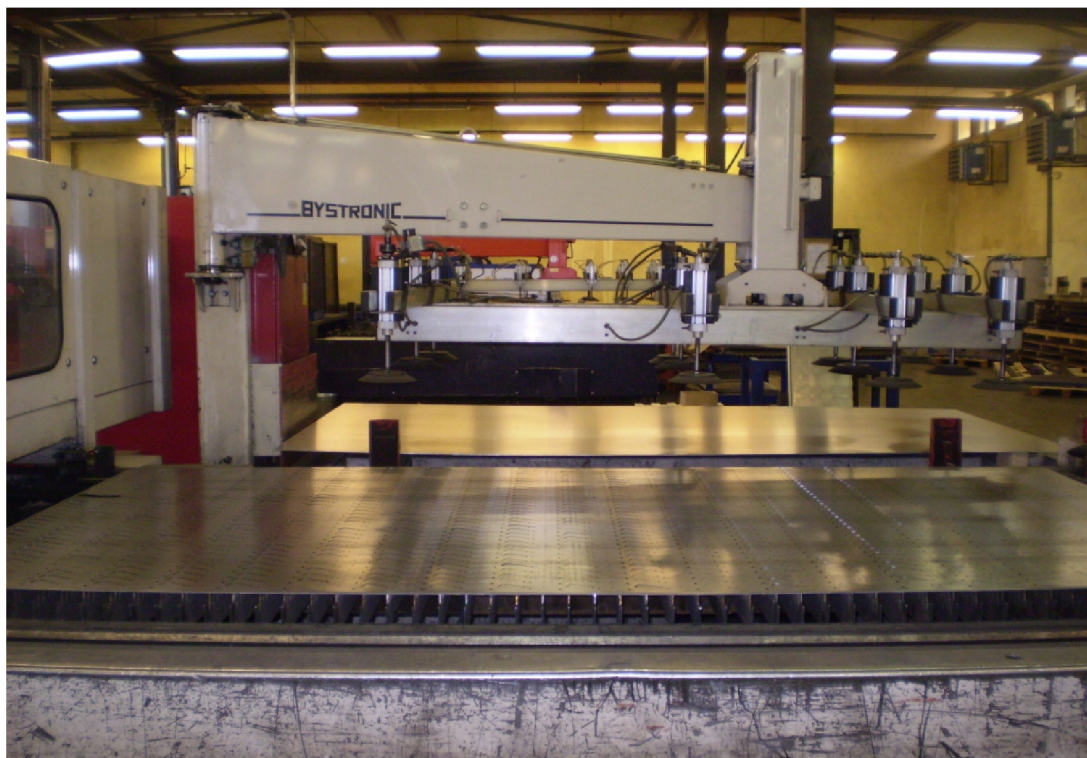
## 6 NÁVRH NA ZVÝŠENÍ PRUŽNOSTI VÝROBY

V této kapitole je řešen návrh na zvýšení pružnosti výroby laserovými stroji značky Bystronic ve firmě Technologické centrum, a. s. Firma se zabývá rovinným řezáním kovových materiálů, proto i požadavek na zvýšení pružnosti při změně sortimentu výroby laserového pracoviště se týká opět jen kovových rovinných součástí. V případě rozšíření sortimentu výroby např. také na výrobky z plastů je třeba řešit problémy, jako jsou: jedovaté plyny vznikající při jejich řezání, zásobování těmito materiály a v neposlední řadě také nalezení nových zákazníků využívající tyto služby.

Samotná technologie řezání laserem je velmi produktivní a je také schopna rychle se přizpůsobit novému výrobnímu sortimentu. Při změně výroby nastává problém především s plynulostí zásobování stroje výrobním materiálem. Proto je zde zhodnocen stávající způsob vkládání materiálu do stroje a návrh nového řešení.

### 6.1 Stávající řešení

Firma disponuje dvěma stroji značky Bystronic a to CO<sub>2</sub> lasery Byspeed 3015 a Bystar 3015. Nyní se pro jejich materiálovou obsluhu používá vkládacího zařízení Byloader.

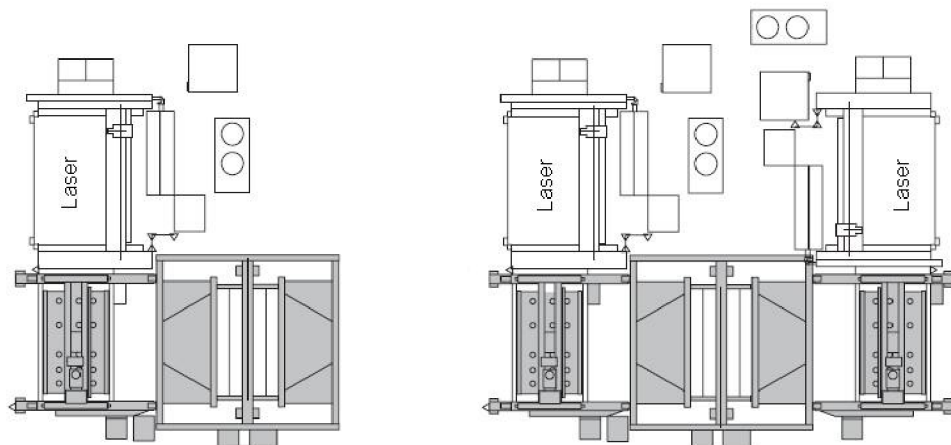


Obr. 6.1 Automatizační systém Byloader

Tento systém automatizace zásobování materiálem je vhodný pro malé výrobní série, které se ve firmě převážně vyrábějí, ale zároveň je náročný na vlastní obsluhu. Při změně výrobního sortimentu je do něj třeba založit potřebný materiál, a to přesně v daném pořadí výroby.

## 6.2 Návrh nového řešení

Jako vhodná varianta pro zvýšení pružnosti a produktivity výroby se nabízí použití věžového zásobníku materiálu ByTrans. Do tohoto automatizačního zařízení je možno naskladnit až 60 tabulí plechu a je možno volit variantu obsluhy jednoho nebo dvou strojů. Jelikož firma vlastní právě dva lasery Bystronic, je výhodné zvolit řešení obsluhující oba stroje.



Obr. 6.2 Schéma obsluhy jednoho nebo dvou strojů<sup>27</sup>

Pro maximální využití laseru i zásobníku je rozhodující největší použitelná velikost tabule plechu. U laserů Byspeed 3015 i Bystar 3015 je to 3000 x 1500 mm. Proto je vhodné zvolit formát automatizačního zařízení také 3015.

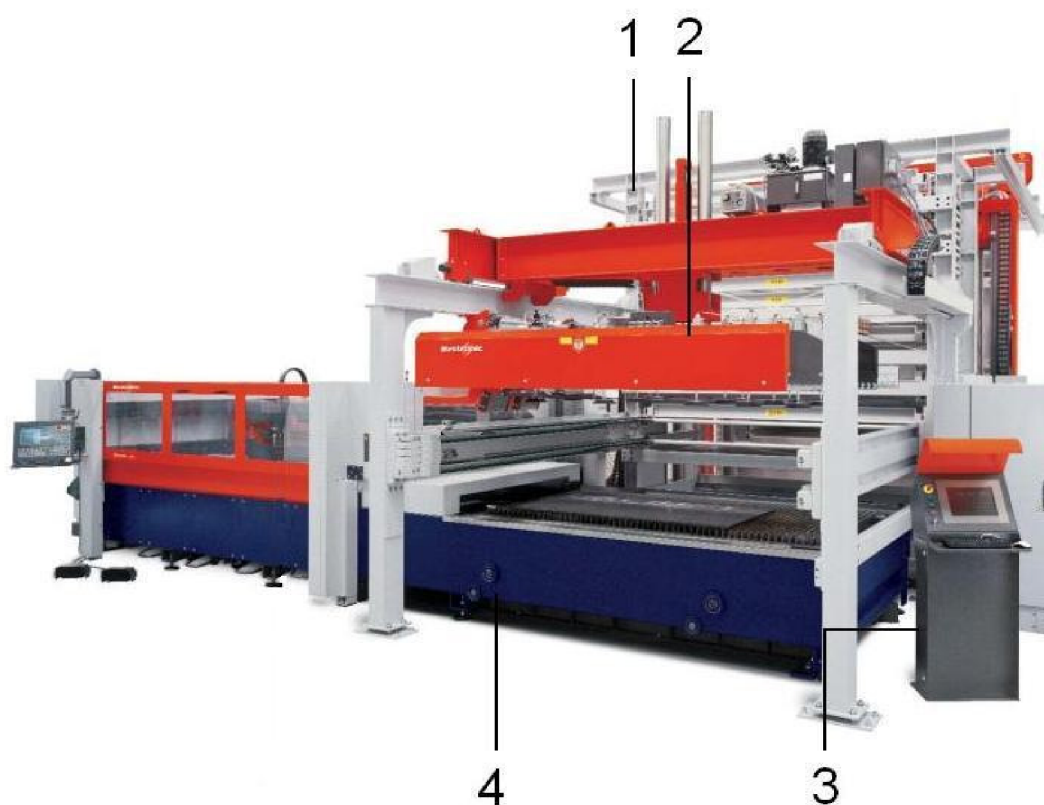
Instalace toho obslužného systému je provedena přímo nad vkládací stůl strojů. Skladovací celek je provozován a kontrolován pomocí ovládacího terminálu nezávisle na laserovém stroji, což je důležité zejména pro doplňování materiálu bez přerušení provozu stroje.

### 6.2.1 Technické parametry zvoleného obslužného systému

Zde jsou rozepsány hlavní technické údaje automatizačního řešení ByTrans 3015 obsluhujícího dva řezací laserové stroje Bystronic.

Tab. 6.1 Technické parametry ByTrans 3015<sup>27</sup>

Max. velikost tabule plechu	3 000 x 1 500 mm
Skladovací kapacita tabulí plechu	3 000 kg
Skladovací kapacita hotových dílů	1 500 kg
Délka ve spojení s Bystar	12 000 mm
Délka ve spojení s Byspeed	14 000 mm
Šířka pro obsluhu dvou strojů	15 500 mm
Min./max. výška	4 400 / 8 200 mm
Min./max. počet skladovacích míst	23 / 61 ks



Obr. 6.3 Stožárový zásobník materiálu Bycell Cross<sup>27</sup>

- 1 - Skladovací věž tabulí plechu, 2 - Nakládací a vykládací jednotka,  
3 - Ovládací terminál skladovacího systému, 4 - Posuvný stůl laseru

### ***6.2.2 Zhodnocení zvolené varianty***

Výhodou tohoto automatizačního řešení je skladovací kapacita pro velký sortiment materiálu. To je vhodné pro malé, střední i velké výrobní série. Pro potřeby malých výrobních sérií je zásobník naplněn několika druhy materiálu, což umožňuje pružnou reakci na změnu výroby. V případě výroby větších sérií je do zásobníku naskladněn potřebný druh materiálu a probíhá produktivní sériová výroba.

## 7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Jako každá výrobní technologie má i metoda laserového řezání technické a ekonomické vlastnosti promítající se do výroby. Zde jsou tato hlediska stručně zhodnocena pro řezání součástí z plechů.

### 7.1 Technické hodnocení řezání laserem

Technologie laserového řezání je zvláště vhodná pro výrobu plochých součástí, a to z běžných kovových materiálů a také těch, které jsou jinými metodami těžce obrobitelné. Výjimku tvoří materiály s vysokou odrazivostí. Limitujícím faktorem metody je také síla řezaného materiálu.

Cyklus řezu je řízen pomocí CNC systému. To umožňuje vyrábět i tvarově velmi složité výrobky při dodržení vysoké rozměrové přesnosti a dobré kvality řezu. Nejen řezný proces je automatizován, také vkládání materiálu do pracovního prostoru stroje a odebírání hotových výrobků může být řešeno plně automaticky.

Mezi výhody také patří úzká řezná spára a malá TOO v porovnání s ostatními tepelnými metodami dělení materiálu. Nevýhodou je malá energetická účinnost, a to především u velmi často používaných CO<sub>2</sub> laserů, která se pohybuje na hranici 15 %.

### 7.2 Ekonomické hodnocení řezání laserem

Cena výrobku zhotoveného technologií řezání laserem je dána několika faktory. Samotná technologie je poměrně drahá a nákladná, což je dáno zejména vysokou pořizovací cenou stroje a provozními náklady (spotřeba plynů, elektrické energie, ...).

#### 7.2.1 Faktory ovlivňující cenu výrobku

Parametry ovlivňující cenu výrobku lze teoreticky rozdělit na stálé (fixní) náklady a parametry proměnné, které se mění se sortimentem výroby.

#### Fixní náklady

- náklady na hodinu provozu stroje,
- režijní náklady (platy zaměstnanců, spotřebované plyny a energie, ...).

**Proměnné parametry**

- parametry materiálu (typ, tloušťka, cena),
- použitý řezný plyn,
- typ a počet vpichů,
- tvarová složitost řezu,
- délka řezaného obrysu,
- sériovost zakázky,
- operace provedené po vyřezání součásti (očistění, omílání, konzervace, balení, ...).

**7.2.2 Vyhodnocení konkrétní ceny výrobku**

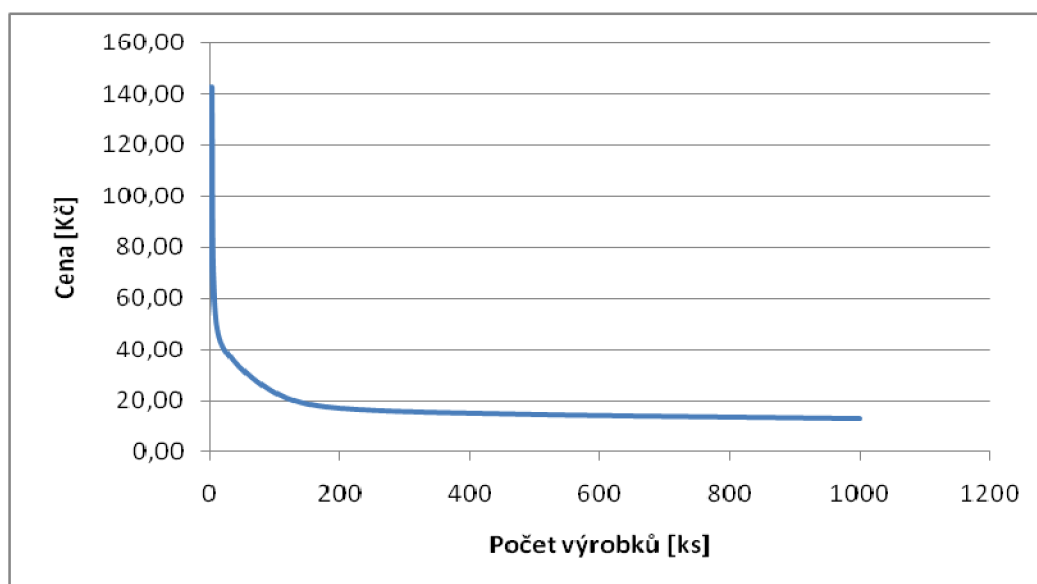
V této podkapitole je uvedena konkrétní cenová nabídka, pro výrobu zkušební vzorku, s danými parametry výroby v závislosti na vyráběném množství.

**Parametry udávající cenu výroby zkušební vzorku**

- parametry materiálu: ocel S 235 JRG,  $t = 5$ , cena  $19 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,
- použitý řezný plyn: kyslík,
- typ a počet vpichů: 2 pulzní vpichy,
- délka řezaného obrysu: 527 mm,
- sériovost zakázky: viz tab. 7.1,
- operace provedené po vyřezání součásti: žádná.

Tab. 7.1 Cenová nabídka výroby zkušební vzorku

Výrobek	Tloušťka [mm]	Materiál	Množství [ks]	Jednotková cena [ $\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$ ]	Celková cena [Kč]
Zkušební vzorek	5	S 235 JRG	2	143,00	286
			5	65,80	329
			100	17,70	1 770
			500	14,60	7 300
			1000	13,70	13 700



Obr. 7.1 Grafické vyjádření ceny výroby vzorku v závislosti na množství

Z grafického vyjádření ceny vzorku na obr. 7.1 lze vidět, že výroba součástí pomocí laserové technologie řezání je vhodná spíše pro středně velkou produkci součástí. Při kusové výrobě je cena zhotovované součásti vysoká, z důvodu zahrnutí nákladů nejen na vlastní výrobu a materiál, ale také nákladů na TPV. Tyto všechny položky se poté rozpočítají na každý vyrobený kus série. Naopak při velkém objemu zakázky už jednotková cena dále téměř neklesá a je dána především cenou provozu stroje a materiálu.

Také poměr mezi cenou výroby a cenou materiálu (tab. 8.2) se snižuje s rostoucím počtem vyráběných kusů a s rostoucí cenou a hmotností materiálu.

Tab. 8.2 Podíl ceny výroby a materiálu

Výrobní série [ks]	Jednotková cena [Kč·ks <sup>-1</sup> ]	Cena výroby [Kč·ks <sup>-1</sup> ]	Cena materiálu [Kč·ks <sup>-1</sup> ]	Poměr cen výroba/materiál
2	143,00	139,80	3,20	43,7
5	65,80	62,60		19,6
20	41,00	37,80		11,8
100	17,70	14,50		4,5
500	14,60	11,40		3,6
1000	13,70	10,50		3,3

Pozn.: Hmotnost zkušební vzorku: 0,166 kg.

## ZÁVĚR

Laserová technologie je jedna z nejčastěji používaných nekonvenčních metod výroby. V této práci je zmíněno několik oblastí využití laseru v průmyslu, ale pozornost je soustředěna především k technologii laserového řezání. Ta je efektivní metodou pro řezání i těžko obrobitelných materiálů v malé až středně sériové výrobě součástí z plechů a profilů.

Úvodní část práce se věnuje obecným tématům, jako jsou historický vývoj laseru, jeho fyzikální princip a konstrukce. Na to je navázáno rozdělením laserů do jednotlivých kategorií, především dle druhu aktivního prostředí. Dále jsou zmíněny způsoby jejich buzení.

Průmyslové využití nachází laserový paprsek v technologiích, jako jsou řezání, svařování, vrtání, značení a gravírování, tepelné zpracování a další. Pro efektivní a kvalitní řezání je třeba věnovat pozornost několika parametrům a nastavením laseru, patří mezi ně např. vlnová délka paprsku, výstupní výkon, kvalita svazku (TEM mód), pozice ohniska a jeho vzdálenost od materiálu a další.

Část zabývající se díly vhodnými pro výrobu laserovou technologií popisuje parametry materiálu. Především se věnuje jeho vlastnostem ovlivňujících proces řezu laserem, tvarové složitosti a sériovosti výroby.

V kapitole věnované technické přípravě výroby je provedeno teoretické seznámení se s problematikou a následný popis TPV ve společnosti Technologické centrum, a. s. Podrobněji je rozepsána především technologická příprava výroby, u které je popsán způsob programování zkušební součásti pro stroj Bystronic Bystar 3015 v systému Bysoft. Následuje vlastní popis výroby vzorku na laserovém pracovišti.

Návrh na zvýšení pružnosti výroby při změně sortimentu se zabývá zhodnocením stávající situace v podniku Technologické centrum, a. s. a navržením opatření pro zvýšení automatizace při zásobování laserů novým materiálem.

Z technicko-ekonomického hodnocení vyplývá nejvyšší ekonomická výhodnost použití řezání laserem pro výrobu součástí v objemu malých až středních sérií. Při řezání jen několika málo výrobků se na ceně značně podílí drahá výrobní technologie laseru. Cena výroby je tak vzhledem k hodnotě materiálu mnohonásobně vyšší. To platí především při kusové produkci a pro výrobu součástí malých rozměrů a tloušťek. Naopak i pro velkosériovou a hromadnou výrobu je laserová technologie poměrně drahá z důvodu vysoké pořizovací ceny stroje a vysokých provozních nákladů, v tomto případě je možné volit například technologii stříhání.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PÍŠKA, Miroslav et al. *Speciální technologie obrábění*. 1. vyd. VUT v Brně, FSI: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007-07-19, č. 4, [cit. 2011-01-26]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni>>.
3. *Technologické centrum*, a.s. [online]. Bellex s.r.o, 2008 [cit. 2011-04-23]. Dostupné na WWW: <<http://www.techcentrum.com/php/tc11.php>>.
4. KUSALA, Jaroslav. *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2011-02-13]. Dostupné na WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>>.
5. *Laserart* [online]. 2010 [cit. 2011-02-20]. Historie laseru. Dostupné na WWW: <<http://www.laserart.wbs.cz/Historie-laseru.html>>.
6. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění 4. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008-03-19, č. 3, [cit. 2011-01-26]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-4-dil>>.
7. *Wikipedia* [online]. 2008, last modified 31st March 2011 [cit. 2011-03-25]. Stimulated emission. Dostupné na WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Stimulated\\_emission](http://en.wikipedia.org/wiki/Stimulated_emission)>.
8. *JetLasers* [online]. 2010 [cit. 2011-02-23]. JetLasersBlog. Dostupné na WWW: <<http://www.jetlasers.net/blog/green%20lasers,%20red%20lasers%20and%20blue%20lasers/diode-lasers>>.
9. *Manufacturing Research Laboratory* [online]. 2005 [cit. 2011-02-23]. TEM mode. Dostupné na WWW: <<http://www.mrl.columbia.edu/ntm/level2/ch02/html/l2c02s07.html>>.
10. ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006-07-17, č. 7, [cit. 2011-03-23]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>>.
11. ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008-07-09, č. 7, [cit. 2011-03-13]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl>>.

12. BENKO, Bernard et al. *Laserové technológie*, 1.vydanie, Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. 122 s. edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.
13. MINAŘÍK, Václav. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. 2007-12-29 [cit. 2011-04-03]. Technologické lasery. Dostupné na WWW: <<http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>>.
14. ŠMÍD, Jiří. Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007-03-14, č. 3, [cit. 2011-03-28]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser>>.
15. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. c2005 [cit. 2011-04-28]. Dostupné na WWW: <<http://laser.zcu.cz/wiki>>.
16. *Linde Gas Technické plyny* [online]. 2008 [cit. 2011-02-15]. Laserová technologie. Dostupné na WWW: <[http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind\\_mv\\_laser3](http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_laser3)>.
17. JANATA, Marek. *Air Products* [online]. 2006-06-19 [cit. 2011-05-10]. Průmyslové lasery a jejich aplikace. Dostupné na WWW: <[http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/pdf/Lasery\\_clanek-MJ.pdf](http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/pdf/Lasery_clanek-MJ.pdf)>.
18. JANATA, Marek a Pavel POLOMSKÝ. *Air Products* [online]. 2004-08-30, 2007-02-24 [cit. 2011-05-24]. Průmyslové lasery. Dostupné na WWW: <[http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Pr%C5%AFmLaser\\_2004.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Pr%C5%AFmLaser_2004.pdf)>.
19. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser*. Prezentace pro podporu výuky předmětu: Speciální technologie svařování. VUT v Brně, FSI, 2010. 22. s. [cit. 2011-05-10].
20. LUKÁŠEK, Jaromír. *Laser ve strojírenství* [online]. 2009 [cit. 2011-04-28]. Dostupné na WWW: <<http://www.welding.cz/laser/laser.htm>>.
21. *Chps, s.r.o.* [online]. 2008 [cit. 2011-05-14]. Dostupné na WWW: <<http://www.chps.cz/>>.
22. KREJZLÍK, Václav. Laserové řezání nekovových materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011-04-13, č. 4, [cit. 2011-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-rezani-nekovovych-materialu>>.
23. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008-05-12, č. 5, [cit. 2011-05-15]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil>>.

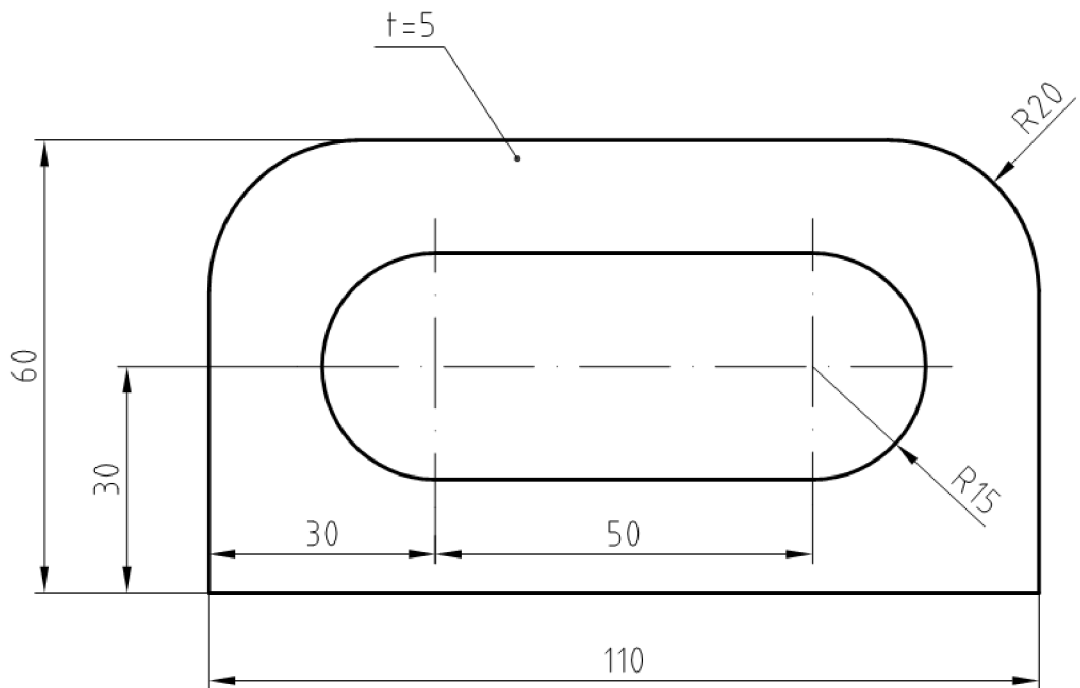
24. ROUBÍČEK, Martin. *Airliquide* [online]. 2006-04-18 [cit. 2011-04-23]. Laserové svařování. Dostupné na WWW: <<http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/laserove-svarovani49120.pdf>>.
25. *Laser-tube* [online]. 2008 [cit. 2011-05-24]. Dostupné na WWW: <<http://www.laser-tube.cz/laserove-zpracovani.php>>.
26. ZEMČÍK, Oskar. *Technologická příprava výroby*. VUT v Brně, FSI: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
27. *Bystronic Czech Republic s.r.o.* [online]. 2004 [cit. 2011-05-15]. Dostupné na WWW: <[http://www.bystronic.cz/cutting\\_and\\_bending/cz/cs/index.php?navid=1](http://www.bystronic.cz/cutting_and_bending/cz/cs/index.php?navid=1)>.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
CNC	[ - ]	Computer Numeric Control Počítačově číslicové řízení
IČ	[nm]	Infračervené záření
KPV	[ - ]	Konstrukční příprava výroby
MPE	[W.cm <sup>-2</sup> ]	Maximum Permissible Exposure Maximální přípustná dávka ozáření
PPV	[ - ]	Projektová příprava výroby
TEM	[ - ]	Transverse Electro-Magnetic Modes Příčný elektromagnetický mód
TgPV	[ - ]	Technologická příprava výroby
TOO	[ - ]	Tepelně ovlivněná oblast
TPV	[ - ]	Technická příprava výroby
UV	[nm]	Ultrafialové záření
YAG	[ - ]	Yttrium aluminum garnet Yttriohlinový granát

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1    Výkres zkušební součásti



Struktura povrchu: 		Hrany: 		Měřítko <b>1:1</b>	Přesnost ISO 2768 - mH Tolerování ISO 8015 Promítání
Materiál S235	Polotovary P5-1000x2000 ČSN 42 5310		Hmotnost 0,166 kg	Chráněno podle ISO 16016	
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE	Druh dokumentu Výkres součásti		Název <b>ZKUŠEBNÍ SOUČÁST</b>		
	Kreslil JAROSLAV INDRA				
	Schválil		Číslo dokumentu		
	Datum vydání 26. 4. 2011		<b>DP 26-04-2011</b>		
List /					