



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE CNC PRO ŘEZÁNÍ LASEREM

CNC APPLICATIONS FOR LASER CUTTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Hruška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Daniel Hruška**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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 bakalářské práce:

Aplikace CNC pro řezání laserem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti dochází k stále většímu rozšiřování numericky řízených strojů, které mj. zvyšují efektivitu výroby. Tento fakt se dotýká také oblasti technologií svařování, a to i v oblasti dělení materiálů. Práce tak bude zaměřena na literární rešerši současného stavu poznání v oblasti aplikace numerického řízení pro řezání laserem.

Cíle bakalářské práce:

- teoretická rešerše CNC,
- rozbor použitelnosti především pro oblast laserového řezání,
- příklady použití,
- formulace výhod a nevýhod.

Seznam doporučené literatury:

ASM INTERNATIONAL. Metals handbook volume 6: Welding, Brazing, and Solder. 9. vyd. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1993. 978-0-87170-382-8.

BENKO, Bernard. Laserové technológie. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. ISBN 80-227-1425-9.

JANE, Blunt. Laser Welding and Cutting. Health and Safety in Welding and Allied Processes. 5th Edition. Woodhead Publishing, 2002, s. 1-7. ISBN 978-1-85573-538-5. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpHSWAPE02/id:kt002Y8U7Q/health-safety--n-welding/laser-welding-cutting?kpromoter=Summon>

RADHAKRISHNAN, P., S. SUBRAMANYAN a V. RAJU. CAD/CAM/CIM. 3rd ed. New Delhi: New Age International Publishers, 2008. 692 s. ISBN 978-8-122-42236-8.

YARLAGADDA, Prasad, Bin LI, An Ping XU, Da Wei ZHANG, Yanling TIAN a Weiguo GAO. Advances in Materials Manufacturing Science and Technology XIV. Durnten: Trans Tech Publications, 2012. 840 s. ISBN 9783037852378.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

.....

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

.....

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

HRUŠKA Daniel: Aplikace CNC pro řezání laserem.

Následující práce se zabývá teorií o řezání laserem. V první části je práce zaměřena na problematiku řezání laserem (princip laseru, metody řezání, rozdělení laserů). Dále je práce zaměřena na základní teorii o automatizaci a NC/CNC řízení strojů. V experimentální části bylo za pomoci firmy UnionOcel s. r. o. vypáleno logo VUT CO₂ laserem.

Klíčová slova: řezání laserem, laser, laserový paprsek, automatizace, CNC stroj

ABSTRACT

HRUŠKA Daniel: CNC applications for laser cutting.

The following thesis deals with the theory of laser. In the first part, the thesis is focused on the issue of laser cutting (laser principle, cutting methods, laser division). Furthermore, the thesis is focused on basic theory of automation and NC/CNC control of machines. In the experimental part, the BUT logo was burned out with CO₂ laser with the help of the company UnionOcel s. r. o.

Keywords: laser cutting, laser, laser beam, automation, CNC machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRUŠKA, Daniel. *Aplikace CNC pro řezání laserem* [online]. Brno, 2020. 35s [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124637>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Řiháček, Ph. D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 26.6.2020

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Řiháčkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracováním bakalářské práce, firmě UnionOcel s. r. o. za poskytnutí pomoci s provedením experimentu a dále děkuji své rodině, přítelkyni a kamarádům za velkou podporu při studiu.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD	9
1 PRINCIP LASERU.....	10
1.1 Možnosti využití	10
1.2 Keyhole.....	11
2 ŘEZÁNÍ POMOCÍ LASERU	13
2.1 Operační módy laseru	13
2.1.1 Kontinuální režim a pulzní režim	13
2.1.2 Q – switch režim.....	14
2.2 Rozdělení laserů.....	14
2.2.1 Plynový laser	15
2.2.2 Pevnolátkové lasery	16
2.3 Metody řezání laserem.....	20
2.3.1 Tavné řezání	21
2.3.2 Oxidační řezání (pálení)	21
2.3.3 Srovnání tavného a oxidačního řezání.....	23
2.3.4 Sublimační řezání	24
3 AUTOMATIZACE A NC/CNC ŘÍZENÍ STROJŮ	25
3.1 Automatizace výrobních procesů.....	25
3.2 Automatizace ve výrobních provozech.....	25
3.2.1 Rozdělení průmyslových robotů.....	26
3.3 Automatizované výrobní systémy	27
3.4 NC/CNC řízení strojů	27
3.4.1 Charakteristika NC/CNC strojů.....	28
3.4.2 Rozdělení NC/CNC strojů	29
3.4.3 Vývojové stupně číslicově řízených strojů.....	29
3.4.4 Příklady nulových a vztažných bodů CNC strojů	30
3.4.5 Výběr základních programovacích funkcí.....	31
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
4.1 Vstupní data	32
5 ZÁVĚRY.....	35
Seznam použitých zdrojů	
Seznam příloh	

ÚVOD [1], [2], [3]

Základní potřebou ve strojírenské výrobě je dělení materiálu. V dnešní době se používají různé druhy dělení materiálu. Jednou z možností je řezání pomocí laseru. Laser má ve strojírenství velmi široké uplatnění. Toto zařízení je dále možno využít ke svařování pomocí průmyslových robotů, k vrtání malých otvorů, pokud nelze použít vrtání pomocí vrtáku, k 3D tisku spékáním kovových prášků nebo také ke gravírování, u kterého se například pomocí laserů dají vytvořit různá loga firem (obr. 1).

LASER neboli Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesilování světla stimulovanou emisí záření, je optický zdroj elektromagnetického záření. První, kdo pojem laser dokázal nějak objasnit, byl německý fyzik Albert Einstein v roce 1917.

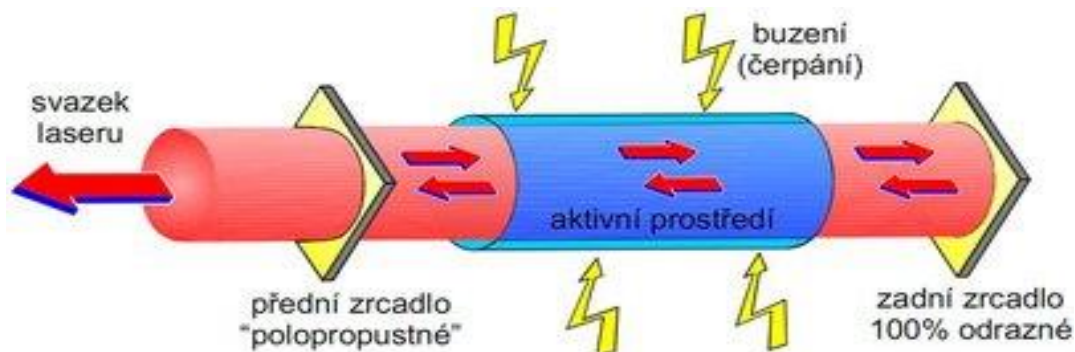
Řezání laserem je jednou z nekonvenčních metod dělení plechů ve strojírenském průmyslu. Mezi další druhy dělení se řadí řez plazmou, kyslíkem nebo vodním paprskem. Existuje několik metod dělení materiálu a také spousta druhů laserů, které jsou aplikovány podle potřeby a vhodnosti použití v dané situaci.



Obr. 1: Příklady řezání laserem [4], [5], [6]

1 PRINCIP LASERU [7], [8], [9]

Laser je označován jako optický zesilovač, který generuje elektromagnetické záření (světlo) pomocí procesu stimulované emise fotonů. Toto záření vzniká ve vhodném prostředí, které je buzeno opticky, elektricky apod. Následně dané aktivní prostředí určuje vlnovou délku paprsku a může být buď pevné, kapalně nebo plynné. Buzením je dodána do laseru energie, která je následně vyzářena v podobě laserového svazku (paprsku). K tomu je zapotřebí vytvořit tzv. optický rezonátor, který je obvykle tvořen řadou optických zrcadel, které mají polopropustný a odrazný charakter (obr. 2). Pomocí těchto zrcadel se výsledný paprsek zformuje a postupně zesílí.



Obr. 2: Vznik laserového paprsku [7]

Dále je paprsek dopraven do řezací hlavy, ze které je následně o velmi vysoké hustotě výkonu, který činí přibližně $10^9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, vyzářen na materiál, na kterém má být proveden řez. Hned po dopadu paprsku se začíná materiál velmi intenzivně zahřívat a postupně se taví a sublimuje. Tento materiál je zahříván rychlostí až $10^6 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$.

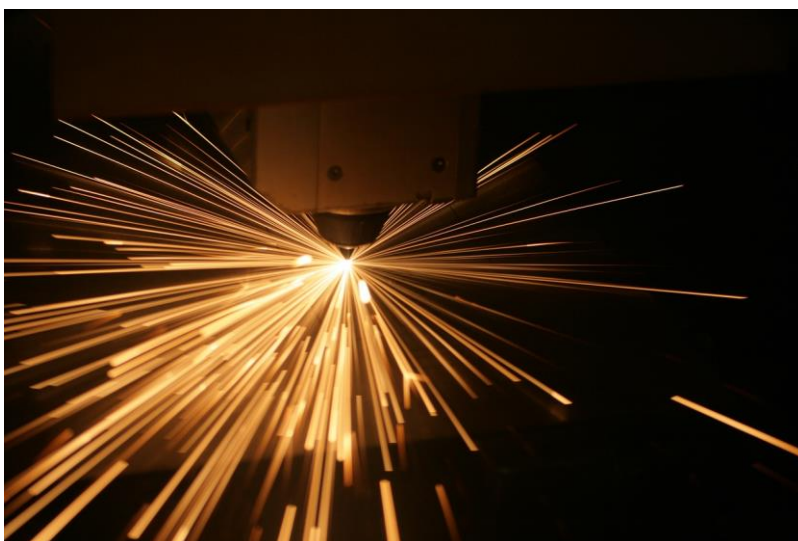
Lasery jsou v průmyslu nezbytnou součástí při výrobě. Jejich vysoká pořizovací cena je kompenzována vysokou spolehlivostí, řeznou rychlostí, univerzálností z hlediska použití a také stupněm automatizace.

1.1 Možnosti využití [7], [8], [9], [10], [12], [13], [14], [18]

Kromě již zmíněného řezání existuje obrovská škála použitelnosti. Obrovské zastoupení laserů je k vidění ve svařovacích operacích, kde jsou často uplatňovány v automobilovém nebo leteckém průmyslu. Svařovací procesy (obr. 3) jsou plně automatizované

a probíhají pomocí svařovacích robotů a dalších CNC zařízení. Ruční svařování se používá už jen zřídka.

Další zajímavou aplikací, jak se dá laser využít, je gravírování. Je to proces, u kterého se vlivem laserového paprsku vypařuje materiál na povrchu do hloubky v řádech mikrometrů. Tato



Obr. 3: Svařování laserem [11]

aplikace se používá k vytváření různých ornamentů (obr. 4), znaků nebo log firem, ale také k výrobě mikročipů. Z tohoto důvodu musí být tento proces velmi přesný, odolný a trvalý. Gravírovat lze širokou škálu materiálů od papíru, přes dřevo, plasty až po kovy.



Obr. 4: Gravírování laserem [15]

Laserem je také možné vrtat malé otvory, a to do hloubky až 15 mm. Materiál je z místa vrtu částečně odpařován a dále vyfukován pomocí tlaku plynu. Vrtání laserem je nejčastěji prováděno na místech s obtížnou dostupností, kde se obyčejný vrták nedostane. Příklad vrtání laserem je znázorněn na obrázku 5.



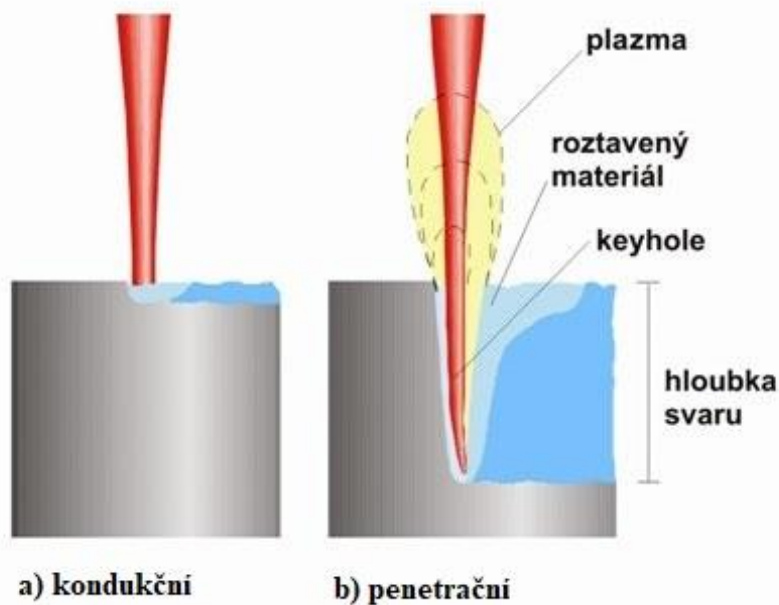
Obr. 5: Vrtání laserem [16]

Následně se tato technologie nalézá také ve zdravotnictví (dermatologie, stomatologie) nebo ve vojenství, kde laser představuje důležitou roli ve zbraňových systémech anebo také v elektronice např. elektrické snímače nebo tiskárny. U zmíněných tiskáren má laser velké zastoupení v aditivních technologiích. Lasery o výkonu 200 – 1000 W jsou využívány při tvorbě plastových součástí nebo prototypů pomocí 3D tiskáren.

1.2 Keyhole [8], [17], [18]

Tento pojem je lépe objasněn u aplikace laserového svařování, u kterého se rozlišují dva základní principy. Prvním typem je svařování vedením tepla (kondukční svařování), kde je materiál nataven absorpcí a vedením tepla dopadajícím laserovým paprskem. Tento pracovní postup povoluje odpaření materiálu do velmi malé hloubky při hustotě výkonu do $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. U tohoto principu platí pravidlo, že šířka svaru je větší než hloubka.

Penetrační svařování je druhým typem svařování. U tohoto principu je využito hlubokého svaru tzv. „keyhole“ (obr. 6). Se zvyšováním plošné hustoty výkonu se docílí kritické hodnoty, u které dojde k vytváření par kovů nad povrchem svařovaného materiálu. Dohromady s působením vysoké plošné energie fokusovaného laserového

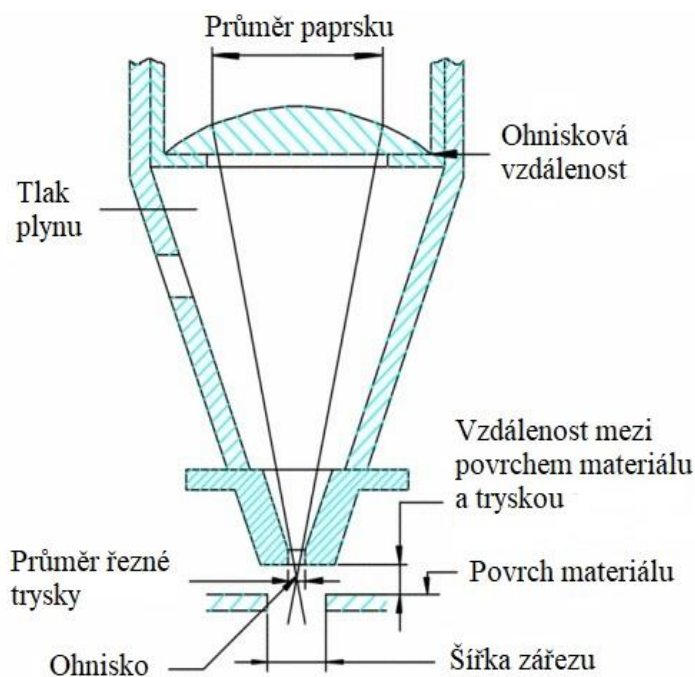


Obr. 6: Srovnání obou metod [17]

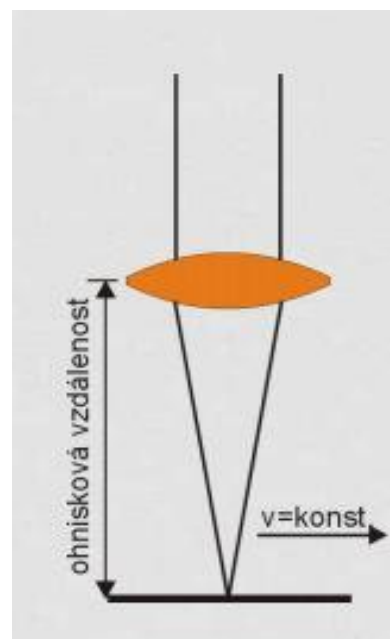
paprsku se začíná vytvářet plazma a dochází k hlubokému provaření. Laserový paprsek vytváří kapiláru, která nabývá velikosti 1,5 – 2 násobku průměru ohniska laserového svazku a je vyplněna párami kovů pod vysokým tlakem. Tlak plynů vystupujících z této kapiláry zabraňuje uzavření této kapiláry. Plazma na povrchu ovlivňuje tvar kapiláry, brání proniknutí fotonů do svárové spáry, absorbuje velkou část záření a snižuje hloubku průvaru. Ze stěn kapiláry se vedením dostává vložená energie do taveniny a následně do tuhého materiálu. Tímto způsobem je možné, aby paprsek pronikl hluboko do materiálu a vznikl tzv. „keyhole“. Uvnitř této kapiláry je dosaženo několikanásobné reflexe, která zlepšuje absorpci v místě dopadu laserového svazku (vznik relativně úzkého a hlubokého svaru). Růst kapiláry je zastaven, když hustota výkonu vlivem divergence paprsku a absorpce stěnami poklesne pod kritickou hodnotu danou ztrátami tepla, odvodem do okolí a vypařováním materiálu.

2 ŘEZÁNÍ POMOCÍ LASERU [8], [18], [19], [20], [27]

Řezání laserem je technologie představující metodu tepelného dělení plechů. Materiál je po dopadu paprsku koherentního světla roztaven. Následně je tento materiál vytlačován z oblasti taveniny proudem stlačeného ochranného plynu a tím se vytváří řez. Mezi typické plyny používané přidělení plechů se vyskytují kyslík, dusík nebo argon. Paprsek vychází z laserové řezací hlavy a produkuje vysokou energii. Laserová řezací hlava (obr. 7) a materiál vytváří exotermickou reakci, která zvyšuje energii potřebnou k řezání. Velikost řezné spáry často nepřekročí hodnotu 1 mm. Obvykle se pohybuje okolo 0,2 - 0,5 mm. Při dělení materiálu je třeba dodržet konstantní vzdálenost ohniska od povrchu materiálu a také konstantní posuvovou rychlost (obr. 8) řezací hlavy kvůli kvalitě řezu. Proto bývá celý proces plně automatizován. Díky automatizaci také nedochází k velkým geometrickým nepřesnostem, které dosahují



Obr. 7: Schéma laserové řezací hlavy [19]



Obr. 8: Schéma ohniskové vzdálenosti [8]

hodnoty maximálně $\pm 0,2$ mm. Výsledkem správného řezu je velmi úzká spára, jejíž tloušťka nepřesahuje hodnotu 0,5 mm a drsnost řezané plochy je poměrně nízká (přibližně Ra 1,6).

2.1 Operační módy laseru [21], [22], [23], [25]

Jedním z hlavních a důležitých faktorů funkce laseru je výkon a časové trvání laserového svazku. Proto se rozlišují tři hlavní pracovní režimy, ve kterých lasery operují. Patří sem:

- kontinuální režim,
- pulsní režim,
- Q-switch režim.

2.1.1 Kontinuální režim a pulsní režim [21], [22], [23]

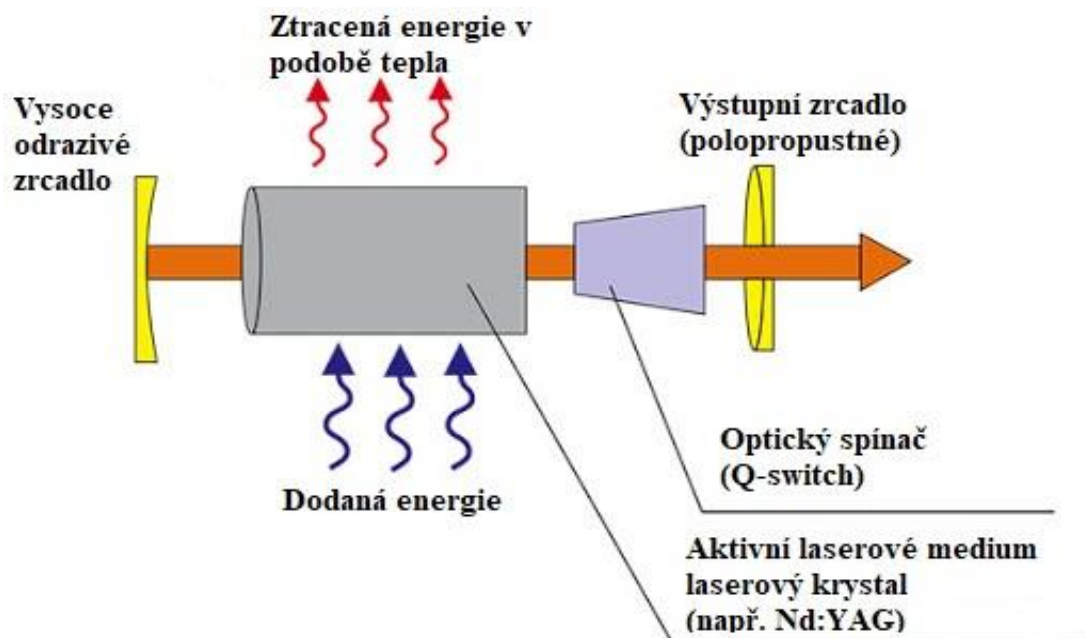
U kontinuálního režimu platí, že je paprsek laseru stále emitován. Při tomto režimu je emise laserového paprsku označena jako CW (continuous wave), což znamená v překladu „trvajícím vlna“. Ve zdroji nedochází k tak radikální akumulaci energie a následným výkonovým výkyvům systému. Povaha záření se přibližuje více k lineární

než k pulzní charakteristice. Výstupní výkon laseru je roven vybuzenému výkonu laseru a střední hodnota náleží maximální hodnotě.

Naopak u pulzního módu laserového paprsku je k vidění buzení díky sérii krátkých pulzů, které zároveň generují krátké výstupní pulzy laserového svazku. Energie paprsku je akumulována delší dobu, proto má laserový paprsek na výstupu vyšší výkon. Díky časovým prodlevám, které jsou důležité k nahromadění potřebné energie k vyzáření, se vytvářejí světelné pulzy. Maximální výkon při tomto režimu je obvykle nižší než excitační výkon. Střední hodnota výkonu závisí na délce pulsu a frekvenci spínání laserového paprsku. Při pulzním režimu má paprsek laseru odlišné vlastnosti a dopad na materiál než při kontinuálním režimu.

2.1.2 Q – switch režim [21], [24], [25]

Jedná se o součástku, která je zakomponovaná v rezonančním obvodu a je schopná převádět kontinuální mód na pulzní a zpět s vysokou energií (obr. 9). Někdy se obvodu s Q – switch součástkou říká „quality switch“, což znamená, že tato součástka zlepšuje kvalitu paprsku. Frekvence spínání probíhá v řádově stovkách kHz. Q – switch dokáže generovat extrémně vysoké výkony v závislosti na časové délce pulzu. V řádech kW je



Obr. 9: Q-switch spínač při průchodu laserového svazku [24]

spínač schopen produkovat výkon po dobu několika nanosekund, a dokonce i výkon o velikosti GW po dobu pikosekund. Z principu existují dva typy režimů. Jedná se o aktivní režim, který lze ovládat elektricky a pasivní režim, který je závislý na výkonu laseru a díky tomu mění tak i své vlastnosti.

2.2 Rozdělení laserů [2], [8], [18], [26], [27], [28], [29], [31]

V dnešní době je rozdělení laserů velmi rozsáhlé, jelikož požadavky konstruktérů a také zákazníků jsou velmi náročné, tak to má důsledek zavádění nových technologií, které budou zpřesňovat výrobu, zkracovat výrobní dobu a také co nejvíce snížit náklady.

Ve strojírenství je důležité rozdělení laserů dle aktivního prostředí, které bude postupně popsáno v následujících podkapitolách. Jedná se hlavně o plynové a pevnolátkové lasery (tab. 1).

Dále je možné lasery rozdělit například takto:

1. Podle vlnových délek optického záření:
 - infračervené (780 nm – 1 mm),
 - viditelné pásmo (360 nm – 780 nm),
 - ultrafialové (10nm – 360 nm),
 - rentgenové (10 nm – 1 pm).
2. Podle časového provozu:
 - kontinuální lasery,
 - pulzní lasery.
3. Podle typu buzení:
 - opticky,
 - chemicky,
 - elektrickým výbojem,
 - tepelnými změnami.
4. Podle zúčastněných energetických hladin na kvantovém přechodu:
 - molekulární lasery,
 - elektronové lasery,
 - jaderné lasery.

Tab. 1: Základní vlastnosti laserů [28]

Laser	Buzení	Životnost [hod]	Režim	Výkon [kW]	Vlnová délka [nm]	Přibližná účinnost	Použití
CO ₂	rádio frekvenčně	20 000	kontinuální/ pulsní	5	10 600	10 %	řezání, svařování
	el. výboj	neomezená		20		25 %	
Nd:YAG	laserové diody	10 000	kontinuální/ pulsní	6	1064	7 %	řezání, svařování
Diskový	laserové diody	10 000	kontinuální	16	1070	15 %	řezání, svařování
Vláknový	laserové diody	100 000	kontinuální, pulzní, kvazikonti.	80	1070	30 %	řezání, svařování, mikro obrábění, gravírování
Diodový	elektricky	15 000	kontinuální/ pulsní	10	808–980	60 %	svařování, kalení, nanášení vrstev

2.2.1 Plynový laser [26], [27], [28], [29]

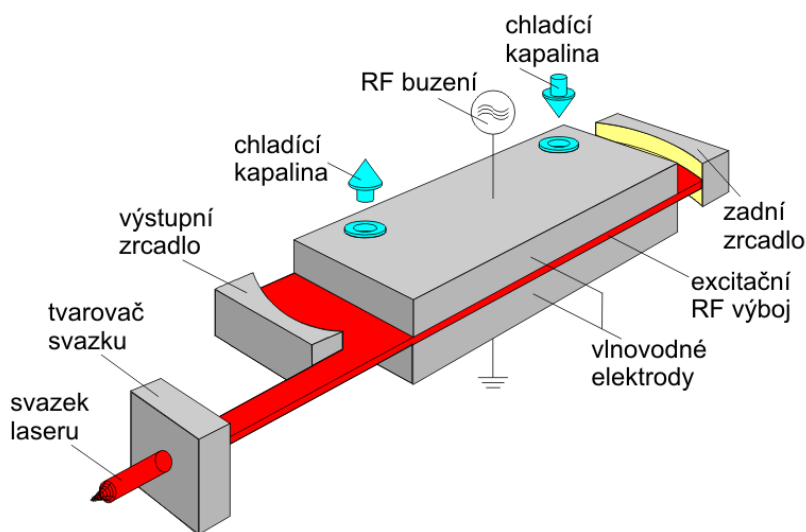
Jedná se o typ laserů, kde je aktivní prostředí tvořeno pomocí plynu nebo nějaké směsi plynů. Plyn nebo směs se volí podle účelu použití daného laseru. Mezi nejznámější typy zde patří helium-neonový laser (nejstarší), argonový laser, excimerový laser a CO₂ laser, který je současně nejpoužívanější z těchto vyjmenovaných typů. Plynové lasery jsou nejčastěji k vidění v kontinuálním režimu a jen zřídka kdy jsou k nalezení v pulzním režimu. Plyny jsou uloženy ve speciálních trubcích, u kterých je na koncích situován rezonátor v podobě malého zrcadla. Uvnitř trubice může plyn dosahovat teploty až 200 °C, proto je důležité jej chladit. Díky dobré cirkulaci plynu

v celém objemu trubice dochází k chlazení. Plynové lasery je možné využívat až do výkonu 20 kW.

- **CO₂ laser**

Asi nejrozšířenějším typem plynových laserů je CO₂ laser (obr. 10). Aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů, která obsahuje oxid uhličitý (CO₂). Tato směs může být v trubici buzena buď rádio-frekvenčně, nebo elektrickým výbojem. Následně je tato směs vyzařována na vlnové délce 10 600 nm. U CO₂ laserů se rozlišují dva typy proudění směsi v rezonátoru. Jedná se o hermeticky uzavřený rezonátor (malé výkony, do 5 kW) a průtočný plynový laser (u vysokých výkonů např. 10kW).

U hermeticky uzavřených rezonátorů se plyn nachází mezi dvěma elektrodami, na kterých vzniká rádio-frekvenční buzení. Nepotřebné teplo je odvedeno na plochy elektrod díky difuzi a tím následně dochází k chlazení. Na těchto laserech je možné sledovat nižší spotřebu aktivního plynu, díky nízkému výkonu, který je zde využíván a také menší provozní náklady než u průtočného typu.



Obr. 10: Schéma CO₂ laseru [28]

U tohoto typu je důležité, že plyn v trubici neustále cirkuluje. Tím dochází k chlazení díky v chladičím zařízení. Aktivní prostředí je buzeno elektrickým výbojem. Díky složité konstrukci a většímu úbytku plynu jsou zde náročnější požadavky na údržbu a provoz.

V tabulce 2 jsou uvedeny různé druhy materiálů a jejich řezné tloušťky, které je schopen CO₂ laser řezat. Záleží také na volbě vhodné metody dělení.

Tab. 2: Materiály a řezné tloušťky CO₂ laseru [33]

	CO ₂ laser
Ocel O ₂	25 mm
Ocel N ₂	8 mm
Ušlechtilá ocel N ₂ , jemný řez	12 mm
Ušlechtilá ocel N ₂ , plazmový řez	20 mm
Hliník N ₂	12 mm

CO₂ lasery se používají ke značení, gravírování a řezání nekovů (plasty, kůže, sklo apod.), kde výkon zařízení nepřesáhne 1,5 kW. U vyšších výkonů (až 20 kW) je využití laserů ke svařování a řezání kovů, kde je jejich použití velmi rozšířené. Nevýhodou CO₂ laserů je jejich velikost a také že nedovedou vést záření pomocí vlákna, jako je to u vláknových, diskových nebo diodových laserů. Záření je vedeno

pomocí zrcadel (dlouhá optická dráha), které potřebují pečlivé nastavení (kalibrace) a čištění, než začne pracovník s laserem pracovat

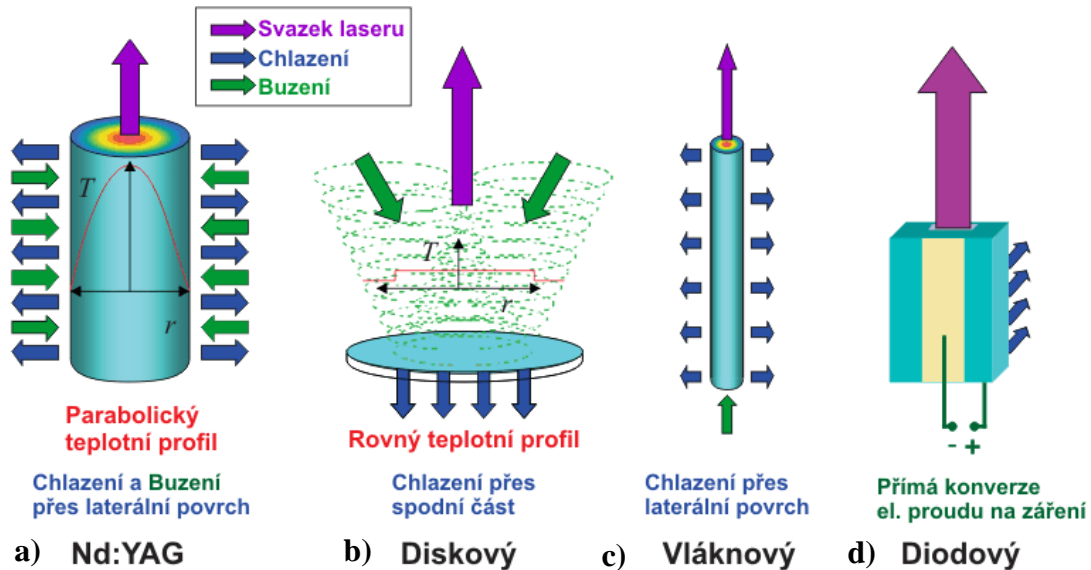
2.2.2 Pevnolátkové lasery [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [34]

Na rozdíl od plynových laserů je zde aktivní prostředí tvořeno maticí umělého YAG krystalu (yttrium-aluminium-granát), případně v ojedinělých případech se jedná o amorfni látku. Pevné aktivní prostředí je doprovázeno směsí vybraných plynů.

K dopování se nejčastěji využívají ionty neodymu (Nd) a ytterbia (Yb), které zesilují elektromagnetické vlnění na elektronových přechodech. U pevnolátkových laserů probíhá buzení obvykle opticky, což mají za úkol laserové diody. Dané aktivní prostředí je vybroušeno do určitého tvaru (vlákno, válec, disk), podle typu laseru (obr. 11).

Výhodou u těchto laserů je, že paprsek laseru je veden pomocí optického vlákna. Dále je důležité, aby se laserové zařízení nezahřívalo. Docházelo by tak k záření s odlišnými vlastnostmi a také by to mohlo vést k fatálním následkům, proto je použito chlazení po celé délce vlákna.

Mezi nejznámější druhy pevnolátkových laserů se řadí Nd:YAG, diskový, diodový a vláknový laser.

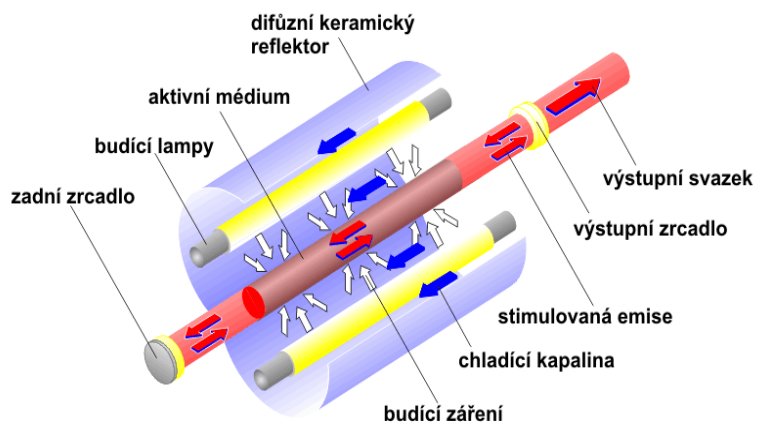


Obr. 11: Druhy pevnolátkových laserů [29]

- **Nd:YAG laser**

Jedná se o nejstarší typ laseru, který se v průmyslu využívá. Aktivní prostředí tvoří krystaly YAG (yttrium-aluminium-granat) a toto prostředí je navíc obohaceno o ionty neodymu (Nd^{3+}). Tyto krystaly jsou zbroušeny do tvaru válce, jak je to znázorněno na předchozím obrázku nebo na obrázku 12. Dříve probíhalo buzení u těchto laserů pomocí elektrických výbojek, ale nevýhodou byla velmi nízká účinnost. Elektrické výbojky byly postupně nahrazeny laserovými diodami, u kterých se účinnost o několik procent zvýšila a s ní i životnost těchto diod. Došlo také ke zlepšení laserového svazku, který je produkován.

Nd:YAG laser pracuje obvykle v pulzním režimu a jen málokdy je k vidění v kontinuálním režimu. Laser využívá vysokou energii v pulzu (až 100 J/ms), která je nezbytná při průmyslových aplikacích. Délka pulzu má hodnotu přibližně 5 pikosekund. Vlnová délka dosahuje hodnoty



Obr. 12: Schéma Nd:YAG laseru [28]

1064 nm. V pulzním režimu dokáže laser provádět operace jako je svařování nebo řezání, ale během těchto operací se válec krystalu zahřívá. Je nutno jej tedy chladit vhodnou kapalinou, ale chlazení probíhá hlavně na povrchu a střed krystalu se chladí špatně. Tím dochází ke vzniku deformace během delšího užívání laseru a také ke zhoršení laserových schopností. Po tomto zjištění se začaly v průmyslu využívat vláknové nebo diskové lasery, které mají nejen vyšší účinnost, ale také chlazení probíhá efektivněji.

- **Vláknový laser**

Vláknové lasery (Fibery) patří mezi nejúčinnější druhy řezání materiálu. V tabulce 3 jsou znázorněny dané materiály a řezné tloušťky jednotlivých vláknových laserů seřazených podle jejich výkonu.

Tab. 3: Materiály a řezné tloušťky vláknového laseru (v mm) [33]

Vláknové lasery	Fiber 2000 [W]	Fiber 3000 [W]	Fiber 4000 [W]	Fiber 6000 [W]	Fiber 8000 [W]	Fiber 10000 [W]	Fiber 12000 [W]
Ocel	12	20	20	25	30	30	30
Ušlechtilá ocel	6	12	15	30	30	30	30
Hliník	8	12	15	30	30	30	30
Mosaz	4	6	8	15	15	15	15
Měď	3	6	8	12	12	12	12

Řezání je z hlediska vybraného materiálu velmi různorodé a také mnohostranné. Nejčastěji je využíváno oceli, ušlechtilé oceli nebo hliníku. Ale dají se použít také jiné materiály jako jsou např. barevné kovy. Z hlediska mnohostrannosti je zde možné vytvářet řezy nejen na rovném plechu daného materiálu, ale také lze provádět řez různých profilů, ohýbaných součástí nebo také trubek.

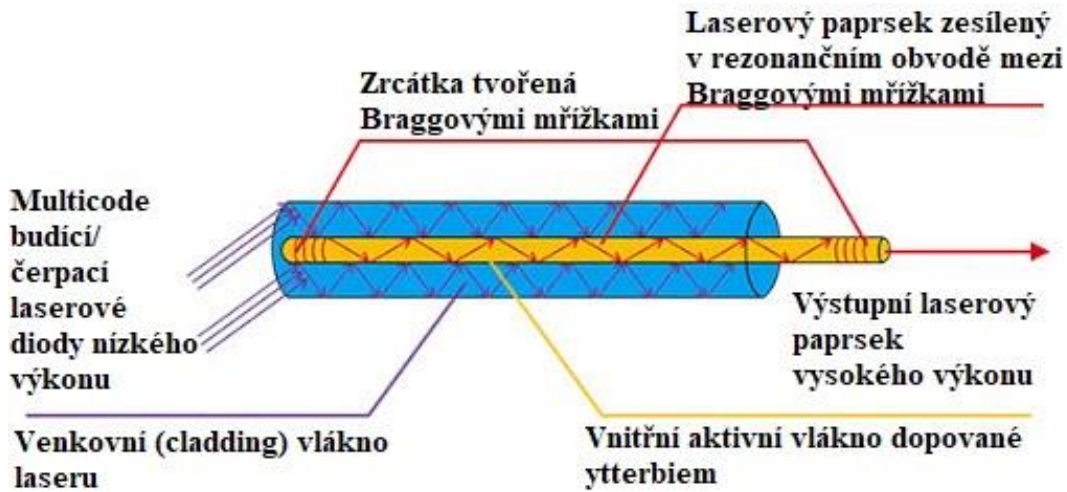
Paprsek vzniká v aktivním vlákně o průměru 1 až 5 μm a dále pokračuje transportním vláknem až k řezací hlavě stroje. Buzení je vytvářeno pomocí LED diod, které jsou schopny dosáhnout životnosti až 100 000 hod. Vláknem je dlouhé až několik desítek metrů. K vedení laserového paprsku vláknem zde neslouží malá zrcadla, ale tzv. Braggovy mřížky, což jsou velmi malé struktury, umístěné přímo na optickém vlákně. Aktivní prostředí vlákna je dopováno prvky vzácných zemin. Jedná se nejčastěji o ytterbium (Yb^{3+}), kde vlnová délka dosahuje až hodnoty 1070 nm. Dalšími prvky, které jsou často aplikovány, jsou erbium, praseodym nebo neodým.

Tyto lasery jsou výkonnější a menší než CO_2 lasery a jsou často využívány na obrábění velmi tenkých, ale i silných plechů z oceli, ušlechtilé oceli, hliníku nebo také barevných kovů. Jedním vláknem je možné docílit výkonu až 500 W. Postupem času docházelo ke zlepšování výrobních technologií, a proto se také následně vyvinulo spojení laserových vláken do tzv. laserových modulů, u kterých je možné vyvinout výkon přibližně 80 kW. Ve firmách při strojírenské výrobě je dostačující výkon 20 kW.

Pomocí vláknových laserů je možné dosáhnout velice úzkých svarů a řezných spár při jemném řezání, a to také při dlouhých pracovních vzdálenostech. Vláknový laser dokáže řezat s účinností až 35 %. Tento typ laseru zdobí jeho nízká hmotnost, prostorové nároky, malé provozní náklady a vysoká spolehlivost, ale vše se naopak

odvíjí od tržní ceny, kde zákazník zaplatí například více než za plynový CO_2 laser. Tento typ laseru je k vidění na obrázku 13.

Mezi přední světové dodavatele patří například TRUMPF (Německo), BYSTRONIC (Švýcarsko) nebo IPG Photonics (Velká Británie).



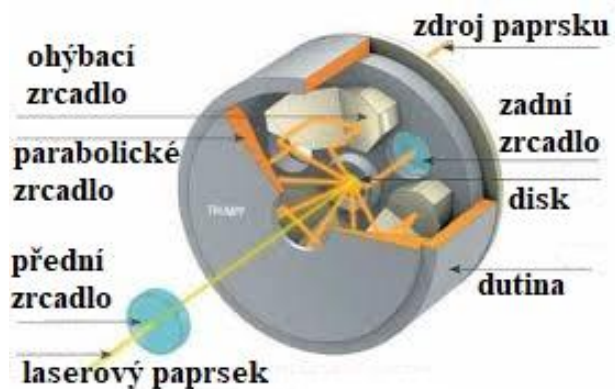
Obr. 13: Struktura vláknového laseru [35]

- **Diskový laser**

Dalším typem laseru, který má za úkol zlepšit řezné schopnosti a nedostatky Nd:YAG laseru je diskový laser. Základem tohoto laseru je vybroušení krystalu (aktivního prostředí) do tvaru malého disku o průměru přibližně 10 cm a velmi malé tloušťce v řádech mikrometrů. Z jedné strany disku je přidělán chladič, který zaručí rovnoměrné chlazení po celé ploše disku, což u Nd:YAG laseru nebylo možné.

Tyto lasery převážně vyrábí německá firma Trumpf a dají se použít nejčastěji v kontinuálním režimu (obr. 14). Při vývoji laseru dochází ke změně aktivního prostředí za účelem zlepšení laserového záření a dalších vlastností vzhledem k dané aplikaci, na kterou má být zařízení použito. Jedná se například o Yb:YAG laser, kde je neodym (Nd) nahrazen složkou ytterbia (Yb), které se zde využívá k dopování. U tohoto typu laseru je navýšena účinnost přibližně na 15 % a také jeho životnost.

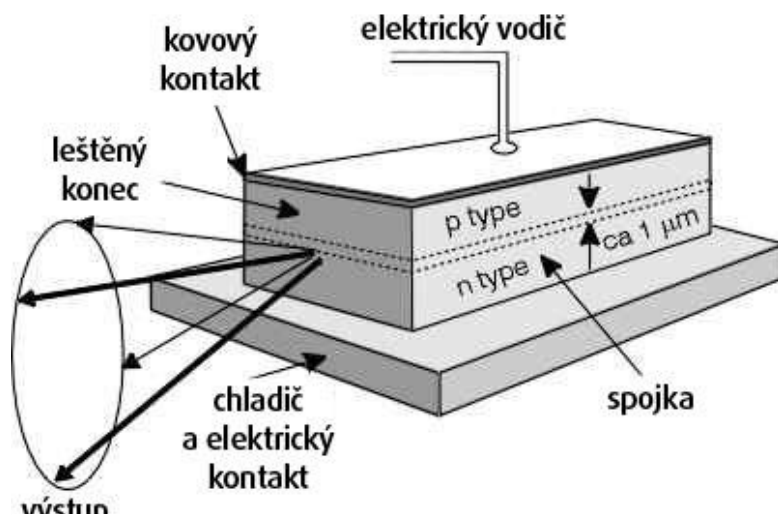
Z hlediska výkonosti diskového laseru se tento typ řadí mezi nejvýkonnější lasery. Zdobí jej jeho multifunkčnost, jelikož v multimódovém provozu je schopen laser vyvinout díky jednomu disku výkon pouze 4 kW. V jednom rezonátoru je tedy reálné využít až čtyři disky najednou a docílit tak výkonu 16 kW, který bohatě stačí na aplikace jako jsou svařování a řezání materiálu a také je díky tomuto vysokému výkonu zvýšena řezná rychlost, čímž se urychlí jednotlivé pracovní operace a výroba daných součástí.



Obr. 14: Řez diskovým laserem [36]

- **Diodový laser**

Jedná se o druh laseru, u kterého je aktivní prostředí vytvořeno pomocí polovodičového materiálu (obr. 15). Řadí se sem například křemík, germanium, galium, arsen, selen a také některé sloučeniny jako je karbid křemíku (SiC), známý arsenid gallitý (GaAs) nebo arsenid hliníku a gallia (AsGaAs). Záření se generuje přímo v tomto polovodiči v PN přechodu, když jím zrovna prochází elektrický proud. Tyto mikroskopické emitory (výkon v řádech mW) jsou poskládány do řad dlouhých několik milimetrů o celkovém výkonu přibližně 10 W. Následně se tyto emitory skládají i na sebe



Obr. 15: Schéma diodového laseru [28]

a vznikají jednotlivé sloupce o výkonu až 600 W. V poslední fázi dochází ke spojování těchto sloupců, kdy může být docíleno výkonu několika kW.

Mezi největší výhody tohoto laseru patří vysoká účinnost, která se obvykle pohybuje okolo 60 %, poměrně dlouhá životnost a také nastavitelnost vlnové délky (přibližně 800–1000 nm). Výkon tohoto laseru se pohybuje okolo 10 kW a je vhodný na povrchové úpravy materiálu, mezi které se řadí navařování, povrchové kalení nebo nanášení vrstev, ale také např. řezání plastů. K předním výrobcům těchto laserů patří firmy Coherent, IPG Photonics nebo Laserline.

Jedinou nevýhodou diodového laseru je špatná kvalita laserového svazku a jeho rozbíhavost, což znamená, že nelze paprsek zaměřit do jednoho malého bodu.

Tento laser může také dosahovat jen miniaturních rozměrů, jelikož je používán nejen ve strojírenském průmyslu, ale také v elektrotechnice, kde je k nalezení v laserových tiskárnách nebo CD/DVD přehrávačích (obr. 16).



Obr. 16: Schéma Nd:YAG laseru [28]

2.3 Metody řezání laserem [32], [37], [38]

Při řezání daného materiálu nebo součásti záleží na volbě určité metody řezání. Mezi nejznámější základní metody zde tzv. patří tavné řezání, oxidační řezání nebo sublimační řezání. Při volbě dané metody řezání je třeba zvolit jeden z ochranných procesních plynů, které jsou pod různým tlakem hnané šterbinou řezu a díky tomu dochází k vytlačení roztaveného materiálu z místa řezu. Každá z metod se pak liší řeznou rychlostí a kvalitou řezných hran.

2.3.1 Tavné řezání [32], [37], [38]

U této metody je materiál zahříván přímo paprskem laseru o vysoké energii na teplotu tavení. Ohnisko paprsku je umístěno do spodní poloviny polotovaru. Poté je docíleno nejlepších výsledků při vytvoření taveniny po celé tloušťce materiálu. Následně je tato tavenina jako odpad vyfukována z místa řezu pomocí inertního plynu, který je přiváděn do místa řezu pod daným tlakem. Řezání pomocí dusíku a výsledný vzhled řezné plochy je znázorněn na obrázku 17.



Obr. 17: Tavná metoda řezání [41]

Při působení inertního plynu by nemělo dojít k žádné chemické reakci mezi tímto plynem a řezaným materiálem. Nejčastěji je využíváno dusíku, který je spojen často s řezáním ocelí, hliníku, mosazi a také mědi. Ale naopak se nesmí použít při řezání titanu, jelikož tyto dva prvky spolu velmi prudce reagují. Proto je mezi inertní plyny k řezání zařazen také argon, u kterého je známé, že může být použit u velmi reaktivních materiálů. Dusík a Argon mají pouze ochrannou funkci. Působí na materiál, brání vzniku oxidace na povrchu materiálu, a také je díky tomu zlepšena kvalita řezných hran.

Nastavení tlaku ochranného plynu je závislé na tloušťce materiálu, šířce řezné spáry a na použitém inertním plynu. Běžně je uváděn tlak od 2 do 20 barů. Je-li tlak nízký, mohou se na spodní straně polotovaru vytvořit zatuhlé kapky taveniny, které je potřeba následně odstranit kvůli kvalitě povrchu. Tato vada se odstraní pomocí chemické lázně, do které je materiál vnořen nebo pomocí ocelových kartáčů.

Řezná rychlost je u této metody nízká – lineárně stoupá s výkonem stroje, ale snižuje se s narůstající tloušťkou materiálu. Proto je tato metoda aplikována obvykle u tenkých plechů.

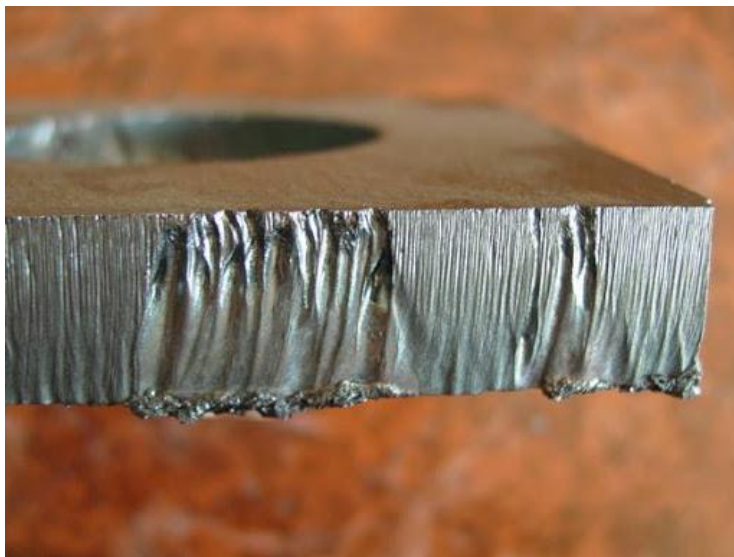
2.3.2 Oxidační řezání (pálení) [37], [38], [39]

Tato metoda se liší od té předešlé tím, že využívá jako řezný plyn kyslík, který je nejdůležitějším prvkem při této operaci. Kyslík zde není považován za ochranný plyn, ale naopak se na operaci dělení materiálu podílí. Daný materiál je pomocí laseru zahřátý na zápalnou teplotu a následně se vytvoří silná exotermická reakce vlivem kyslíku a nahřátého materiálu. To znamená, že energie je uvolňována prostřednictvím zdroje tepla. Zdrojem tepla je laser a kyslík toto dělení zesiluje. U této metody dochází k několikanásobnému zvýšení energie při řezání díky této reakci než u tavného řezání.

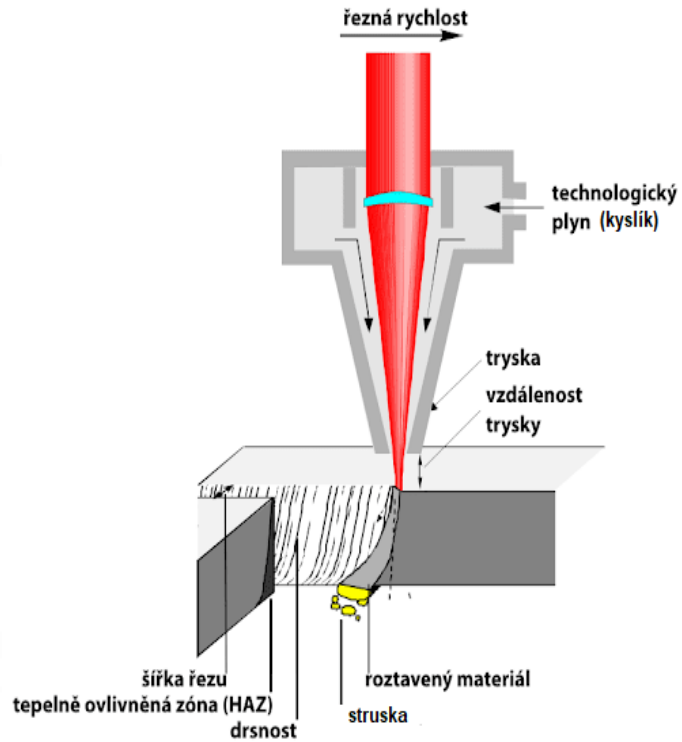
Materiál je postupně nataven a proudem kyslíku je také vytlačen z místa řezu (obr. 18). Hodnota tlaku, jakou kyslík proudí, je od 1 do 6 barů. Díky vysoké energii, která je při dělení dodávána dochází i k částečnému spálení materiálu.

Při této metodě je možné dosáhnout daleko vyšší řezné rychlosti než u tavného řezání, to znamená, že řez může proběhnout rychleji, což se ale projevuje na kvalitě řezu, která nebude tak dobrá, jak u předchozí metody.

Oxidační řezání je vhodné využít pro řezání nízkolegovaných a středně legovaných ocelí. Při řezání zde vznikají na povrchu nežádoucí oxidy, které jsou těžko odstranitelné a znehodnocují obrobek (obr. 19). Dále je možné řezat pomocí této metody konstrukční oceli až do tloušťky 40 mm.



Obr. 19: Výsledná řezná plocha po oxidačním řezání [39]

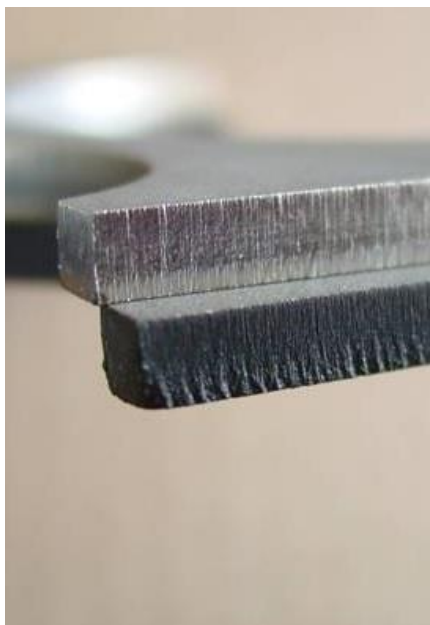


Obr. 18: Schéma oxidační metody řezání [42]

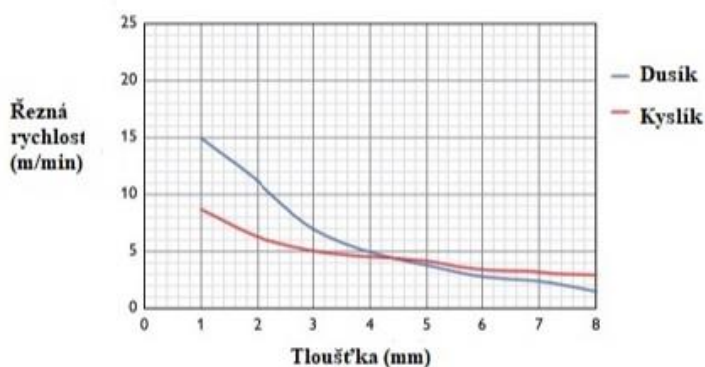
Díky vysokému ohřevu nelze provádět laserem detailní řezy jako u tavné metody, jelikož by u ostrých hran a rohů obrobku docházelo k deformaci (roztavení) vlivem vysoké teploty. Výsledná plocha, která je vytvořena řezáním, je zoxidovaná a vyskytuje se zde vyšší drsnost povrchu. Pro většinu aplikací je řez touto metodou ale dostačující.

2.3.3 Srovnání tavného a oxidačního řezání [37], [38]

Při řezání korozivzdorného plechu oxidační metodou a metodou tavení je docíleno dvou rozdílných výsledků. Na obrázku 20 (a) lze pozorovat, že při řezání dusíkem (metoda tavení) plocha řezu dosahuje daleko vyšší kvality (horní plech) než při řezání kyslíkem (dolní plech), kde řezná plocha obsahuje černošedé oxidy chromu, které jsou nežádoucí. Na obrázku 20 (b) je znázorněna závislost řezné rychlosti na tloušťce řezaného materiálu pomocí kyslíku a dusíku. Proto se korozivzdorná ocel



a) řezání pomocí kyslíku a dusíku

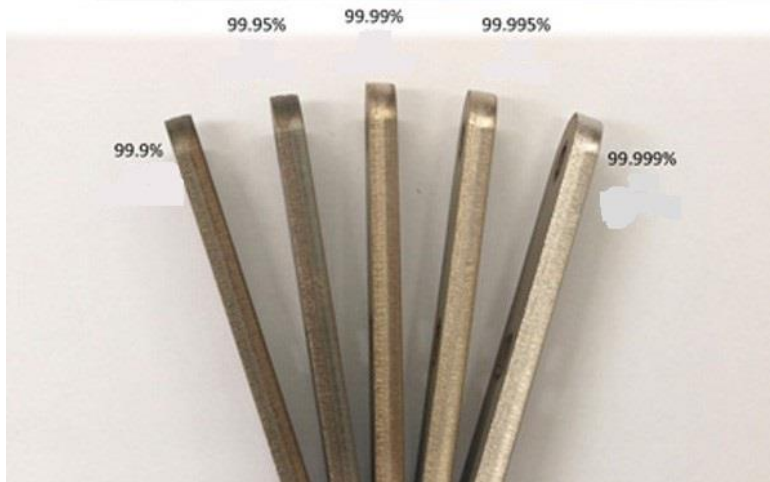


b) grafické znázornění obou metod

Obr. 20: Srovnání obou metod řezání [43]

častěji řeže metodou tavení pomocí dusíku. Naopak je ale i výhodné řezání kyslíkem, jelikož náklady jsou přibližně o 20 % nižší a řez probíhá rychleji, pokud není tedy potřeba velmi kvalitního povrchu.

Dalším zajímavým úkazem je znečištění vlivem kyslíku u tavné metody, který je zde obsažen v setinách nebo tisícínách procent. U řezání pomocí dusíku není dosaženo vysokých řezných rychlostí. Zvýšením tlaku dusíku je možné tuto rychlost navýšit. Ideální tlak pro řezání korozivzdorných ocelových plechů o vyšší tloušťce se pohybuje mezi 10 a 15 bary. Při řezání korozivzdorné oceli a hliníkových materiálů je dbáno na vysokou čistotu dusíku, pokud má být kvalita hran co nejlepší. Na obr. 21 je k vidění zbarvení jednotlivých materiálů v důsledku oxidace. Čím vyšší procento kyslíku se při řezání vyskytne, tím více nabývá materiál žluté barvy. Při řezání metodou tavení je hodnota čistoty dusíku nastavena alespoň na 99,995 % a vyšší.

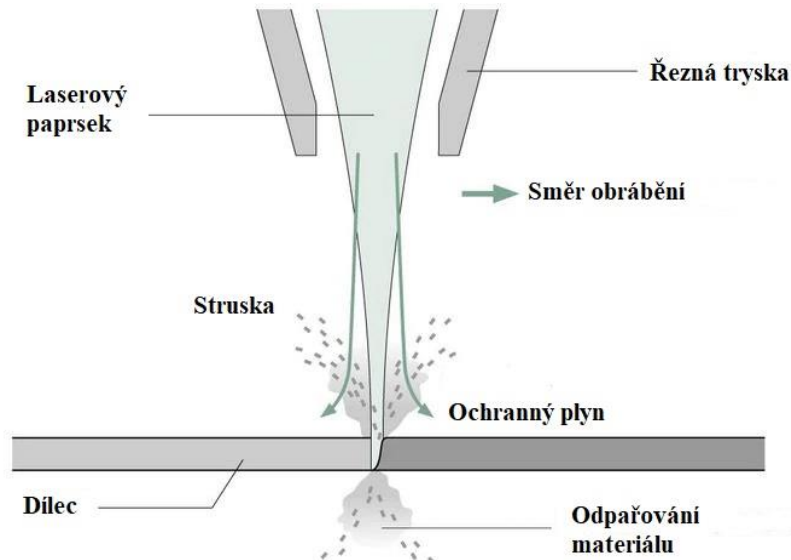


Obr. 21: Znečištění kyslíkem při tavné metodě [39]

Zbytek následně tvoří kyslík a ostatní nežádoucí plyny. Pokud nebude řezná rychlost příliš vysoká, tím bude oxidace nižší a čistota dusíku se zvýší. Výsledný vzhled materiálu po řezu nebude nažloutlý.

2.3.4 Sublimační řezání [37], [38], [40]

Poslední zmíněná metoda je energeticky nejnáročnější, protože laserové záření mění použitý materiál z pevného skupenství rovnou na plynné (obr. 22). To znamená, že se materiál v místě řezné spáry vypařuje. U laserového zařízení je potřeba pečlivé nastavení optiky v závislosti na tloušťce materiálu. U této metody je potřeba dodržet podmínku, že tloušťka použitého materiálu nesmí být větší než průměr laserového paprsku.



Obr. 22: Schéma sublimační metody řezání [40]

V mnoha případech není tloušťka materiálu větší než 1 mm. Tato podmínka se neváže na nekovové materiály a materiály, které se netaví jako je např. keramika nebo textilie. Kdyby tato podmínka nebyla dodržena u kovů, nedocházelo by k úplnému vypařování, ale část nataveného materiálu by zkondenzovala a vedlo by to ke vzniku svaru.

I u této metody je důležité použití inertních plynů, které mají za úkol odstranit z místa řezu páry a zbytky taveniny. Tyto plyny jsou vyfukovány pod tlakem, který se pohybuje mezi 1 až 3 bary. Dochází zde opět k použití dusíku a poté také argonu jako u metody tavení a je zabráněno vytvoření oxidace v místě řezu, čímž je docíleno kvalitních řezných hran.

Řezná rychlost je nejnižší ze všech tří vyjmenovaných typů řezání a v místě řezu tak nebývá materiál tepelně ovlivněn jako u předchozích metod. Proto je tato metoda vhodná pro řezání různých detailů a také pro tvorbu tvarově složitějších součástí.

3 AUTOMATIZACE A NC/CNC ŘÍZENÍ STROJŮ [12], [44], [45], [46], [49]

Automatizace podmiňuje využití samočinných řídicích systémů (regulátorů nebo počítačů) k řízení technologických strojů a procesů. Jak již bylo výše zmíněno řezání laserem probíhá za pomoci CNC strojů. Automatizace minimalizuje přítomnost člověka při vykonávání určité pracovní činnosti a tuto činnost vykonává počítačem řízený stroj.

Základní prostředky automatizace:

- zařízení a prostředky hmotného toku
- zařízení a prostředky informačního toku
- zařízení a prostředky energetického toku
- řídicí systémy
- vlastní výrobní stroje a zařízení s různou úrovní automatizace
- ostatní pomocné automatizační prvky

Automatizace se do průmyslové výroby dostává za účelem částečného nebo úplného odstranění člověka z výrobních procesů. Tyto procesy nebo aktivity, které člověk provádí mají být postupně nahrazeny číslicově ovládanými automatickými stroji. Příčiny automatizace mohou být například:

3.1 Automatizace výrobních procesů [12], [44], [45], [47]

Cílem tohoto druhu automatizace je poskytnutí hlavního a obslužného procesu v různých odvětvích výroby. Jedná se například o automatizaci v dolech, hutním průmyslu, strojírenském průmyslu (např. lisovny, svařovny, válcovny, slévárny), elektrotechnickém průmyslu nebo stavebnictví. Mezi známé produkty výrobní automatizace se řadí:

- automatizované linky
- výrobní roboty
- systémy CIM (Computer Integrated Manufacturing)
- bezobslužné výrobní stroje
- pružné výrobní systémy (FMS – Flexible Manufacturing System)

Automatizace výroby přináší z jedné strany zjednodušení práce, zefektivnění výroby a značných ekonomicko-provozních úspor, ale naopak narůstá hluk při provozu, prašnost, adaptace a devastace přírody, celkové zhoršení životního prostředí nebo vznik nových civilizačních chorob. Díky automatizaci také dochází k nárustu nezaměstnanosti.

Z technického hlediska technického hlediska vyžaduje automatizace ovládání nového druhu údržby (měřících přístrojů a dalších automatizačních zařízení), přizpůsobení technologie pro přechod na plynulou výrobu, přizpůsobení technologického zařízení, vyřešení problému rentability a důležité je také mít vysokou vzdělanost pracujících.

3.2 Automatizace ve výrobních provozech [48], [49], [52]

Rozvoj automatizace výrobních procesů není závislý jen na možnostech daných technických prostředků, ale bude ovlivňován i vývojem vlastních technologií. Další vývoj realizace technologií lze očekávat ve směru pružných systémů tvořených multifunkčními výrobními stroji a roboty.

Automatický provoz výrobních strojů, zařízení, systémů si nelze představit bez automatické manipulace, která tuto automatickou činnost technologických prostředků ve většině případů podmiňuje. Nejznámějším symbolem automatizace výrobních procesů se následně stal průmyslový robot. Tento robot je technickým systémem

(strojem), který nahrazuje mobilní, lokomoční a intelektuální funkce člověka. Je to programovatelné vícefunkční technické zařízení se schopností zpětné vazby, schopností manipulační, prostorově orientační a také se často pyšní svou univerzálností. Jednou z nejznámějších společností, která roboty vyvíjí, je firma ABB. Další významnou společností je firma FANUC. Mezinárodní organizace pro standardizaci následně přijala definici robota jako: „automaticky řízený, opětovně programovatelný, víceúčelový manipulátor pro činnost ve třech nebo více osách, který může být buď pevně ukotven na místě, nebo mobilní k užití v průmyslových automatických aplikacích“.

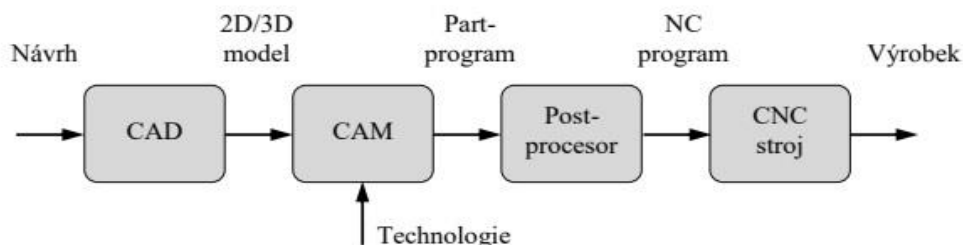
3.2.1 Rozdělení průmyslových robotů [48], [49], [52]

Rozdělení průmyslových robotů může být různorodé. Jedná se například o rozdělení podle způsobu použití (řezání nebo svařování), podle konstrukce apod.

- Podle způsobu použití:
 - Řezací roboty (laser)
 - Svařovací roboty
 - Lakovací roboty
 - Paletizační roboty
- Podle konstrukce:
 - Karteziánské roboty (přímočaré)
 - Kloubové roboty
 - Dvouramenné roboty
 - Šestiosé roboty
 - Delta roboty
- Další dělení:
 - Ruční manipulátory
 - Manipulátory s pevným programem
 - Manipulátory s pružným programem

Samotná technická zařízení se skládají z několika částí, tzv. konstrukčních skupin. Každý stroj je vybaven periferií, do které je možné zakomponovat panel pro ruční ovládání, mechaniky pro externí paměti, terminál a popřípadě tiskárnu.

Další významnou částí je řídicí systém, který dle nakonfigurovaného programu řídí činnost robota pomocí ovládání jeho pohonů a dalších kinematických struktur. Při tvorbě řídicího programu se vychází z geometrie polotovaru, nástrojů, výsledné podoby součásti a z dalších technologických podmínek a funkcí. Daný software využívá data importovaná z CAD systému a následně systém CAM je připravuje pro samotnou realizaci (obr. 23). CAD/CAM systém lze chápat nejen jako oblast v CIM, ale také jako



Obr. 23: Schéma CAD/CAM (výroba součásti) [52]

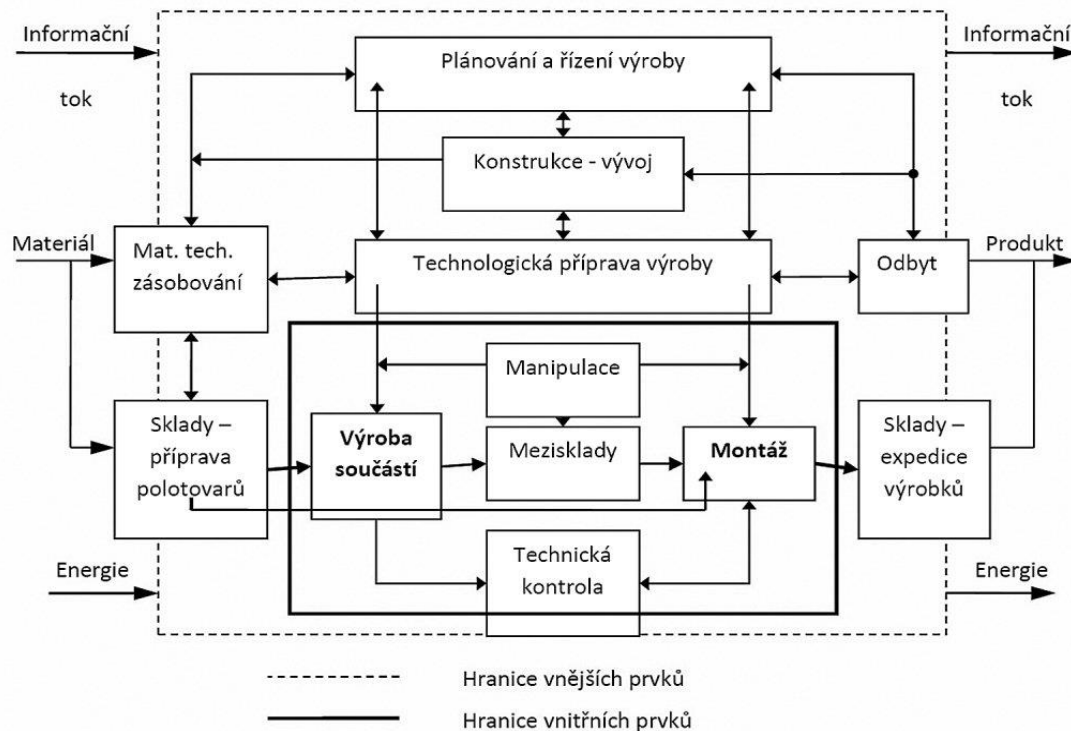
technologii výroby nebo jako specializovaný software. CIM zahrnuje širokou škálu vývojových i výrobních činností (od vývoje součásti po hotový výrobek).

Samotná konstrukce obsahuje pohony, kinematiku, odměřovací zařízení a senzory. Pohon je hybná síla stroje, která pohybuje strojem v předem určených osách.

Kinematika je mechanická konstrukce skládající se z ramen a kloubů a svým rozsahem definuje pohybové možnosti robotu. Odměrovacím zařízením je snímána okamžitá poloha stroje. A nakonec díky senzorům, které jsou považovány za měřicí čidla robotu, je zjišťována poloha, velikost nebo tvar dílce, který má být obráběn.

3.3 Automatizované výrobní systémy [48], [49], [52]

Struktura elementárního technologického pracoviště se skládá z technologického prostředku pro realizaci jedné technologie, vstupního a výstupního zásobníku objektů zpracování, manipulátoru objektů, zásobníku a manipulátoru nástrojů. Možnosti struktury pracoviště vycházejí z různého stupně integrace konstrukce uvedených funkčních částí. Spojením struktur jednotlivých technologických pracovišť dohromady vzniká výrobní systém (obr. 24). V tomto systému mohou být některé struktury



Obr. 24: Schéma výrobního systému [53]

automatizované. Jedná se například o výrobu součástí nebo montáž.

Aby takový celek byl schopen fungovat, musí být odolný vůči vnějším vlivům nebo před vzájemným ovlivňováním jednotlivých částí výrobního systému. V tomto systému se vyskytuje mnoho druhů rušení. Tato rušení se často šíří prostorem a mají za následek ovlivnění elektrických zařízení automatizovaného výrobního systému. Rušení se šíří

zařízením pomocí elektrické a magnetické indukce, nebo se také šíří galvanickými částmi, jako jsou vodiče a další kovové části konstrukce.

Tento automatický výrobní systém je možné chránit před poruchami například vysokofrekvenčními filtry, správným zemněním nebo také ochranou před přepětím. Mezi časté poruchy se řadí chybovost stroje, ztráta dat, přechod systému do nežádoucího stavu při daném procesu nebo elektrické ztráty způsobené vysokofrekvenčním rušením.

3.4 NC/CNC řízení strojů [12], [54], [55]

NC (numerical control) neboli číslicové řízení je důležitou složkou při automatizaci obráběcích strojů. Na rozdíl od strojů, které jsou ovládané ručně, jsou tyto stroje

obsluhovány programovatelnými příkazy, které jsou nahrány do paměťového média. Tyto číslíkové příkazy (kódy) jsou vyznačené na tzv. děrné pásce nebo děrném štítku stroje. První NC stroje se začaly vyskytovat ve 40. a 50. letech 20.století.

Následně s průmyslovým pokrokem byly NC stroje vybavovány počítačem. Takto později začaly vznikat první CNC (computer numerical control) stroje. Díky připojenému počítači se daný program mohl v počítači uložit a později se na něm mohlo zase pokračovat. Toto u NC strojů možné nebylo. Tyto stroje měly zaručit zjednodušení výroby a jejich řízení. Výroba byla produktivnější a levnější. CNC stroje už nebyly tak prostorné, proto docházelo k úspoře pracovních ploch např. pro skladování materiálu. Naopak docházelo k propouštění pracovníků na dílnách. Cena CNC strojů se vzhledem k jejich stabilním výkonům snižuje, ale kvalita vyprodukovaných výrobků se zvyšuje.

3.4.1 Charakteristika NC/CNC strojů [12], [54], [55]

Jak je již známo NC stroje využívají k obráběcím procesům sérii kódů, které jsou nahrány na děrné pásce. Pomocí těchto kódových instrukcí stroj provádí obrábění daného materiálu. Tyto kódy obsahují čísla, písmena nebo jakékoliv jiné symboly. Každý ze symbolů má za úkol provádět nějakou funkci. Později jsou kódové instrukce přeměňovány na elektrické impulsy, které dále spustí pohybové motory daného NC stroje. Pokyny pro NC obrábění se dělí na funkce, které řídí pohyb vřetene a další pomocné funkce, které mají za následek ovládní rychlosti stroje, výběr nástroje pro obrábění nebo směr rotace vřetene. Tyto pokyny se dále shromažďují a následně i třídí. Toto logické uspořádání se nazývá program NC nebo také G kód.

Dalším typem stroje je CNC stroj (obr. 25), který je oproti NC stroji obohacený o počítač. V češtině je zkratka CNC známá pod názvem „počítačem řízené číslíkové stroje“. Řídicí systémy jsou hlavní součástí CNC strojů. Na jejich spolehlivosti a přesnosti je zaměřena kvalita celého obráběcího procesu. Mezi jedny z nejoblíbenějších

řídicích systémů patří systémy FANUC, kterých už bylo ve světě prodáno přes 1,5 milionů kusů. Tento typ obráběcího stroje je schopen pracovat a obrábět danou součást na základě programu v počítači, který vytvoří daný programátor tohoto stroje v příslušné počítačové aplikaci. Toto je nejvyžívanější technologie současné doby, kterou využívá spousta známých a špičkových firem.



Obr. 25: CNC stroj (vláknový laser) [58]

Další méně známou zkratkou je zkratka DNC (Direct numerical control – přímé počítačové řízení). Hlavní procesor ovládá jeden nebo více strojů. Toto koordinační zařízení se ale nevyžívá až tak často, protože se jeho cena pohybuje velmi vysoko. Časem byly vyvinuty mikroprocesory a na trhu se začaly objevovat systémy DNC (distributive numerical control – operační počítačové zařízení). Toto DNC zařízení je možné si představit jako jeden centrální počítač, který ovládá dva a více DNC strojů najednou.

3.4.2 Rozdělení NC/CNC strojů [12], [54], [55]

Existuje spousta kritérií, podle kterých je možné NC/CNC stroje rozdělit. Mezi typické rozdělení číslicově řízených strojů patří:

- **Rozdělení podle technologických operací** – Číslicově řízené obráběcí stroje jsou rozděleny do dvou hlavních skupin. První z nich se nazývají jednoprofesní stroje, které je možné využít pouze na jeden druh operace. Jedná se například o soustružení, vrtání nebo frézování. Druhou skupinou jsou víceprofesní číslicové stroje, které jsou schopny zvládnout více operací najednou. Tyto NC stroje jsou známy jako obráběcí centra.
- **Rozdělení podle hlavního pohybu obrobku:**
 - Frézka,
 - soustruh,
 - bruska.
- **Rozdělení podle počtu současně řízených os:** NC/CNC stroje používají k pohybu kartézský souřadnicový systém, který je pravotočivý a pravoúhlý s osami X, Y, Z. K určení souřadnicového systému stroje se obvykle používá pravidlo pravé ruky.
 - **Jednoosé obrábění (1D)** – Jedná se o stroj, který vykonává posuvný pohyb pouze v jedné ose (např. osa Z) a zároveň jeho nástroj vykonává rotační pohyb kolem této osy. Nejznámějším strojem, který tento účel splňuje, je stojanová vrtačka.
 - **Dvouosé obrábění (2D)** – Tento typ stroje koná posuvný pohyb pomocí supportu například v osách X a Y. Typickým strojem, který tento pohyb vykonává, je soustruh. K posuvnému pohybu ještě navíc přibývá rotační pohyb sklíčidla, ve kterém bývá upnutý obrobek. Sklíčidlo tak rotuje kolem jedné z os posuvného pohybu.
 - **Třiosé obrábění (3D)** – Nejtypičtějším zařízením, které umožňuje tento pohyb je frézka. Pohyblivý support se pohybuje v osách X, Y a nástroj (fréza) koná pohyb v ose Z. Tento obráběcí stroj dokáže obrábět materiál velmi rozmanitých tvarů.
 - **Pětiosé obrábění (5D)** – Pohyb pěti osami zaručují v dnešní době CNC stroje na špičkové úrovni. Tyto stroje se nazývají CNC obráběcí centra. Řadí se zde také laser. Zaručují standardní pohyb v osách X, Y, Z a další dvě osy jsou situovány tak, aby byly schopny zaručit rotační pohyb kolem dvou základních os (např. X a Y).

3.4.3 Vývojové stupně číslicově řízených strojů [4], [54], [55]

- **1. vývojový stupeň číslicově řízených strojů** – tyto obráběcí NC stroje se řadí mezi nejstarší používané číslicově řízené stroje. Tento typ strojů byl ale nepřesný z hlediska výroby součástí, spolehlivosti a technologických možností. Docházelo také k častým poruchám.

- **2. vývojový stupeň číslicově řízených strojů** – dalším vývojovým posunem docházelo ke zlepšení technologických možností. Tyto NC stroje byly postupně vybaveny servomotory. Výměna nástrojů u těchto strojů byla prováděna ručně. Vznikaly stroje s dopravníkem třísek. Obvykle se jednalo o soustruhy. Jako příklad je zde uveden americký model stroje MILWAUKEE – MATIC od firmy Kearney & Trecker (obr. 26).



Obr. 26: Stroj 2. vývojového stupně [59]

- **3. vývojový stupeň číslicově řízených strojů** – ve 3. vývojovém stupni dochází k vyšší kapacitě zásobníků nástrojů pro obrábění. Obráběcí stroj už dokázal upozornit na výměnu nástroje a obsluha stroje ho pak jen ručně vyměnila. Jako další velký posun v tomto vývojovém stupni byla automatická výměna obrobků pomocí systémů stroje.
- **4. vývojový stupeň číslicově řízených strojů** – v tomto období je možné poprvé použít termín CNC. U těchto strojů probíhá už i automatická výměna nástrojů. Tyto stroje jsou plně automatizované a nastal zde velký progres. Dosud se ale neřešila problematika okolních nežádoucích vlivů. Jedná se například o zahřívání stroje, prašnost, hlučnost, otřesy při fungování stroje nebo kvalitu zdrojů energie.
- **5. vývojový stupeň číslicově řízených strojů** – u tohoto vývojového stupně je jasné zlepšení vůči negativním vlivům, které byly pozorovány u strojů 4. vývojového stupně. Dochází k úspěšnému zautomatizování základních funkcí CNC obráběcích strojů a nachází se zde první mechatronické prvky. V systému je zavedeno měření rozměrů obrobku, kompenzace chyb, použití systémových čidel a měřících sond pro přesnou polohu obrobku.
- **6. vývojový stupeň číslicově řízených strojů** – toto je nynější a nejnovější vývojový stupeň číslicově řízených strojů. Řadí se zde všechny typy CNC strojů, CNC obráběcí centra nebo CNC výrobní linky. Toto období má za následek zdokonalení číslicově řízených strojů. Jedná se o zrychlení výroby a snížení časů výměny nástrojů a obrobků. Stroje jsou přesnější, než bývaly. Dokáží pracovat s přesností v desetínách i setínách mikrometrů.

3.4.4 Příklady nulových a vztažných bodů CNC strojů [4], [54], [55]

Ihned po zapnutí CNC stroje je aktivován souřadnicový systém, ve kterém stroj pracuje. Každý stroj musí mít svůj počátek tzv. nulový bod, ze kterého vychází. Tento bod je určen pomocí systému stroje. Kromě nulových bodů se při obrábění vyskytují i další pomocné (vztažné) body. Mezi základní vztažné body patří:

- **M – nulový bod stroje** – tento bod je považován za výchozí bod stroje pro všechny souřadnicové systémy a bývá obvykle určen výrobcem stroje. Tento bod nelze měnit a má své pevné místo.
- **W – nulový bod obrobku** – tento bod je určen programátorem na daném místě obrobku. Nastavení je tohoto bodu je umožněno pomocí dané G funkce.

- **C – výchozí bod programu** – tento bod je považován jako počáteční bod programu. Určuje se mimo obráběnou součást. Velmi často se používá na výměnu nástroje nebo také na výměnu součástí.
- **R – referenční bod stroje** – Referenční bod je dalším bodem, který určuje přímo výrobce. Nulový a referenční bod stroje mají mezi sebou přesně odměřenou vzdálenost a jsou vloženy do řídicího systému CNC stroje. Moderní CNC stroje, které jsou schopny pomocí funkce absolutní odměřování polohy určit polohu, už nepoužívají referenční bod.
- **F – vztahový bod suportu nebo vřetene** – bod F se vztahuje k výměně nástroje na revolverové hlavě u soustruhu. K tomuto bodu se vztahuje délková korekce nástroje.
- **E – bod nastavení nástroje** – Tento bod náleží do oblasti držáku nástroje, který se při upnutí nástroje ztotožní s bodem F. Je nutný pro zjištění korekcí nástroje na přístroji mimo stroj.
- **A – dorazový bod** – Bod A se nachází na ose soustruhu, na který dosedá součást v upínacím přípravku (sklíčidlo).

3.4.5 Výběr základních programovacích funkcí [4], [54], [55]

Norma ČSN ISO 6983 zahrnuje funkce v řadě G00 až G99 a M00 až M99. Některé základní druhy funkcí budou vyobrazeny v tabulce 4. Jedná se o instrukce ke zpracování technologických a geometrických informací, které vytváří programátor. Tyto funkce se vkládají do daného programu a CNC stroj podle těchto funkcí obrábí danou součást. Každá z funkcí v programu má svůj význam.

Tab. 4: Základní programovací funkce []

Označení funkce	Význam funkce
G00	Rychlé lineární polohování (rychlý posuv)
G01	Lineární interpolace (pracovní posuvy po přímce)
G02	Kruhová interpolace ve směru hodinových ručiček (zaoblení)
G03	Kruhová interpolace proti směru hodinových ručiček (zaoblení)
G04	Časová prodleva (upínání obrobku robotem)
M00	Programovatelný stop programu
M03	Otáčky vřetene ve směru hodinových ručiček
M04	Otáčky vřetene proti směru hodinových ručiček
M05	Zastavení vřetene
M06	Výměna nástroje

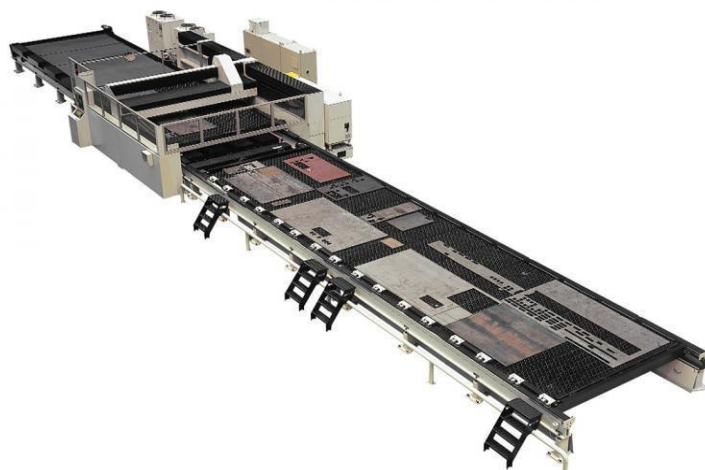
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části je vytvořit logo školy. Znak a text se jménem školy bude vypálen pomocí CO₂ laseru v kopřivnické firmě UnionOcel s. r. o.

4.1 Vstupní data

Na začátek budou sepsány vstupní údaje o součásti a o stroji, který tento proces vykonal. Poté následuje výrobní postup výrobku.

- **Technologické údaje stroje** – součást pálená laserem byla vytvořena pomocí pálicího stroje IMPULS 12530 (obr. 35) od firmy LVD. Jedná se o velkokapacitní laserový řezací stroj na bázi CO₂ určený pro výrobu (pálení)



a) schéma CNC stroje z webu



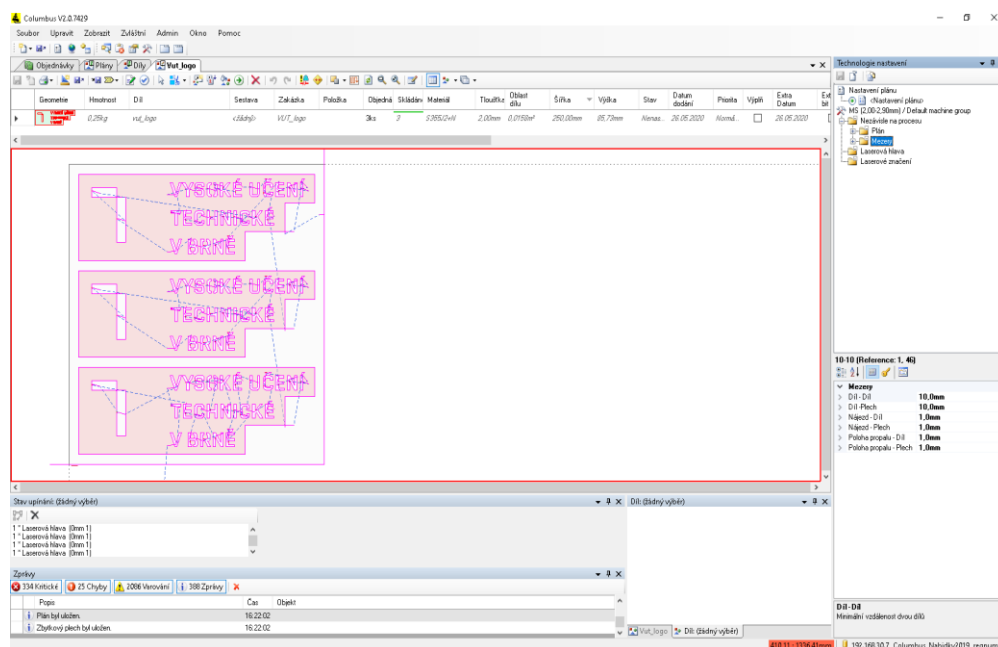
b) foto stroje z firmy

Obr. 35: Schéma stroje IMPULS 12530 [56]

těžkých plechů z konstrukční oceli. CNC řezací stroj IMPULS 12530 disponuje maximálním výkonem 6 kW a spínací frekvencí 60 Hz.

Stroj využívá ke své práci motory, servomotory a automatizované řídicí systémy společnosti FANUC. Dále tento CNC stroj obsahuje dva kyvadlové stoly o rozměrech 12500 x 3000 mm. Těchto strojů bylo vyrobeno a prodáno velmi málo z hlediska jeho prostorové náročnosti.

- **Tvar součásti** – tvar součásti odpovídá tvaru loga školy. Součást byla vypálena z plechu o velikosti polotovaru 255 x 90 mm a tloušťkou 2 mm. Součást nejprve měla mít menší rozměr, ale po zvážení a projednání s kolegy z firmy UnionOcel se zvolil tento rozměr součásti. Důvodem byl nečitelný text loga školy. Proto výsledná součást dosáhla tohoto rozměru.
- **Programovací systém Columbus (obr. 36)** – tento programovací systém od firmy ESAB využívá firma UnionOcel k následnému zhotovení dílců pálených pomocí laseru nebo řezaných plazmou na daném CNC stroji. Tento systém je vhodný pro programování bez připojeného počítače. Systém Columbus zahrnuje všechny požadované funkce důležité pro import, nakreslení dílů,



Obr. 36: Prostředí aplikace Columbus

optimalizaci desky a pro automatické vložení specifických parametrů ve vztahu k použité technologii pálení. Konzistentní, modulární struktura Columbusu umožní nejlepší přizpůsobení k požadavkům všech zákazníků.

- **Výrobní postup** – po stažení obrázku loga školy se pomocí programu AutoCAD Mechanical 2017 vytváří výrobní výkres. Hotový výkres je odeslán v souboru DWG nebo DXF do firmy UnionOcel. V této firmě probíhá nahrání souboru do programu Columbus s pomocí kolegů. Po zkontrolování programu Columbus, zda je součást vyrobitelná, se začíná vytvářet pálicí plán. V tomto plánu jsou postupně zadány rozměry plechu a rozměry loga, materiál (S355J2+N), stroj (IMPULS 12530), druh operace (pálení laserem) a počet zhotovených kusů. Hotová součást je zobrazena na obrázku 37.



Obr. 37: Hotové logo

Po zhotovení součásti dosahuje hodnota drsnosti povrchu Ra 12,5. Poté je povrch hotové součásti obroušen brousícím papírem a následně je z důvodu lepšího přilnutí barvy na povrch součásti nanášena lehká vrstva líhu. Až se součást vysuší, tak je na povrch nanášena červená barva ve dvou vrstvách.

5 ZÁVĚRY

Práce byla zaměřena na problematiku CNC řízení řezání laserem. V první části byla řešena problematika spojená s principem a druhy laserů a jejich využití pro řezání plechů. Dále bylo zhodnoceno další možné použití laseru jako je svařování, gravírování nebo 3D tisk. S následujícím vývojem nových technologií se objevuje několik druhů laserů (plynové, pevnolátkové), pomocí kterých je možné řezat materiál. V průmyslové výrobě je také kladen důraz na použití vhodné metody řezání (tavná, oxidační, sublimační). Laser, ale není jedinou metodou, kterou je možné řezat materiál. Dále jsou v práci zmíněny metody řezání pomocí kyslíku, plazmy nebo vodního paprsku.

V posledních kapitolách byla věnována pozornost hlavně teorii o automatizaci a NC/CNC řízení strojů, pomocí kterých je řezání laserem umožněno. Hlavními výhodami těchto CNC strojů jsou efektivnější a přesnější výroba nebo snížení pracovního času na výrobu součástí. Mezi nevýhody se naopak řadí poruchy strojů, které často řeší kvalifikovaní pracovníci nebo snížení stavů (nezaměstnanost).

V praktické části této práce bylo vytvořeno logo VUT. Jednalo se o vytvoření výrobního výkresu v aplikaci AutoCAD a následně se na plech z konstrukční oceli vypálil znak a text školy pomocí CO₂ laseru.

Seznam použitých zdrojů [60]

- [1] Wikipedia [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [2] KUBÁTOVÁ, Jitka a Ivo LUKEŠ. *Laserové technologie opracování kovových materiálů*. Dobrá u Frýdku-Místku: Výzkumný ústav hutnictví železa, 1988. Hutnické aktuality (Výzkumný ústav hutnictví železa). ISSN 0322-8252.
- [3] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Praha: MM publishing, 2014. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [4] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD+laserem&rlz=1C1SQJL_csCZ804CZ804&sxsrf=ALeKk025POek62-xsUGbJWPPK3C0tZnprw:1593074538246&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjds8-PyZzqAhUJEcAKHSXjB5oQ_AUoAXoECBUQAw#imgrc=q2mca0hMUw4tQM
- [5] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD+laserem+&tbm=isch&ved=2ahUKEwif9TtypzqAhUW7qQKHTEeDeMQ2-cCegQIABAA&oq=sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD+laserem+&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECCMQJzICCAAyBAgAEB4yBAgAEBgyBAgAEBhQ8_sBWPUcAmCbiAJoAHAAeACAAdQBiAHWBpIBBTauNC4xmAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWc&sclient=img&ei=O2X0Xt-NNpbckwWxvLSYDg&rlz=1C1SQJL_csCZ804CZ804#imgrc=cRjS221AqvFlcM
- [6] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=sva%C5%99ovac%C3%AD+robot&tbm=isch&ved=2ahUKEwiV4raAy5zqAhUIIcUKHVI8DRoQ2-cCegQIABAA&oq=sva%C5%99ovac%C3%AD+robot&gs_lcp=CgNpbWcQAzICCAAyBAgAEBgyBAgAEBgyBAgAEBgyBAgAEBgyBAgAEBgyBAgAEBg6BAgjECc6BggAeAgQHICUgwIYmskJYOHLCWgBcAB4AIAB-wGIAe0YkgEGMC4xOS4ymAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWc&sclient=img&ei=Y2X0XtWkD6XCIAbs-LTQAQ&rlz=1C1SQJL_csCZ804CZ804#imgrc=OmZtV2wtUwJpHM
- [7] Lao [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [8] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf

- [9] *Lintech* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/laserove-vrtani>
- [10] *Lao* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-vrtani-92>
- [11] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20laserem&tbm=isch&hl=cs&hl=cs&tbs=rimg%3ACbG-zTOV6I-PYTE3pvf72y71&rlz=1C1SQJL_csCZ804CZ804&ved=0CBsQuIIBahcKEwjwMvn4JzqAhUAAAAAHQAAAAAQDg&biw=1349&bih=657#imgrc=d4IDdnPg7WereM
- [12] *Lao* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znaceni-89>
- [13] *Lintech* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/novinky/hluboke-gravirovani-laserem/>
- [14] *KAVALIR* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.gravirovani-laserem.com/gravirovani-znaceni-laserem.php>
- [15] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.megaflex.cz/lasery/files/2015/06/laser-marking.jpg>
- [16] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://budexpert.com.pl/english/wp-content/themes/Rolox/timthumb.php?src=http://budexpert.com.pl/english/wp-content/uploads/2017/06/Laser-Tube-Cutting-1024x482.jpg&h=250&w=550&zc=1>
- [17] *Průmyslové lasery* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
- [18] BENKO, B. a kol. *Laserové technologie*, Technická universita, Bratislava 2000, ISBN 80-227-1425-9
- [19] CHENMIN, L., H. YONGBIAO a F. BAOQIN. *The State-Of-The-Art and Development Tendency of CNC Laser Cutting Machine at Home and Abroad-An Overview* [online]. Xian, China, 2012 [cit. 2020-06-19]. ISBN 9781457719653. Dostupné z: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/6342008>
- [20] *Flow* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Srovnaci-Rezani.aspx#waterjet>
- [21] *Leonardo technology* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/operacni-mody-laseru>

- [22] *Lintech* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-technologie/vlaknovy-kontinualni-laser>
- [23] *Lintech* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-technologie/vlaknovy-pulsni-laser>
- [24] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=ohniskov%C3%A1%20vzd%C3%A1lenost%20laser&tbm=isch&tbs=rimg%3ACbfujTij4w6sYTUpIHuqJcrI&rlz=1C1SQJL_csCZ804CZ804&hl=cs&ved=0CBsQuIBahcKEwiY-vqrz5zqAhUAAAAAHQAAAAAQBg&biw=1349&bih=657#imgrc=f-Ma9k1uj8amvM
- [25] *Leonardo technology* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [26] *Lascam* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [27] *ASM INTERNATIONAL. Metals handbook volume 6: Welding, Brazing, and Solder.* 9. vyd. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1993, 2873 s. ISBN 978-0-87170-382-8.
- [28] *MEGABLOG* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.megablog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- [29] *Průmyslové lasery* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
- [30] *TRUMPF* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diodovy-laser/trudiode/
- [31] *Co rozhoduje při volbě typu laseru* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
- [32] *IPG Photonics* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://lasersystems.ipgphotonics.com/resources/blog/how-to-laser-cut-copper-and-other-reflective-metal>
- [33] *Bystronic* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.bystronic.cz/cs/produkty/systemy_rezani_laserem/ByLaser.php
- [34] *FANUC: Zdroje vláknového laseru* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/laserov%C3%A9-syst%C3%A9my/vl%C3%A1knov%C3%BD-laser>

- [35] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=v1%C3%A1knov%C3%BD+laser&tbm=isch&ved=2ahUKEwjD783IgbnoAhUG1OAKHYviCc0Q2-cCegQIABAA&oq=v1%C3%A1knov%C3%BD+laser&gs_lcp=CgNpbWcQAzoCCABQ8_cBWKS0AmCtuAJJoAXAAeACAAbABiAH0DpIBBDuMTSYAQCgAQGqAQnd3Mtd2l6LWltZw&sclient=img&ei=9RR9XoOhMiaogweLxafoDA&bih=657&biw=1366&rlz=1C1SQJL_csCZ804CZ804#imgrc=QF0PjvDe7oNQjM
- [36] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=diskov%C3%BD+laser&tbm=isch&ved=2ahUKEwi-j4Cj5rjoAhUu1uAKHRy1BvIQ2-cCegQIABAA&oq=diskov%C3%BD+laser&gs_lcp=CgNpbWcQAzoCCABQ36KhAViu1KEBYIrZoQFoBXAAeACAAbIBiAGuE5IBBDuMjCYAQCgAQGqAQnd3Mtd2l6LWltZw&sclient=img&ei=V_h8Xv6HCq6sgwec6pqqDw&bih=657&biw=1366&rlz=1C1SQJL_csCZ804CZ804#imgrc=S-8G49fkDTSW3M
- [37] *Mazak* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.mazakoptonics.com/news-events/blog/cutting-assistance/>
- [38] *NITROGEN* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.nitrogen4u.co.uk/laser-cutting/>
- [39] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/rezani-laserem/materialy>
- [40] *TRUMPF* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/sublimacni-rezani/
- [41] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://hagfas.ir/Product-241503>
- [42] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=%C5%99ezani+laserem+schema&tbm=isch&ved=2ahUKEwi7t8j8g53qAhUXuKQKHYPwCO8Q2-cCegQIABAA&oq=%C5%99ezani+laserem+schema&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJzoHCCMQ6gIQJzoCCAA6BAgAEBhQtKoCWLbgAmCH4wJoAXAAeASAAa4EiAHXLJIBDDuMTguNC4wLjluMpgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nsAEK&sclient=img&ei=H6H0XvurO5fwkgWD4aP4Dg&bih=647&biw=643&rlz=1C1SQJL_csCZ804CZ804#imgrc=t-6NOKPjDqyWmM
- [43] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD+kysl%C3%ADk+vs+dus%C3%ADk+material&tbm=isch&ved=2ahUKEwjM0Lr-gp3qAhWMNOwKHdkxA0EQ2-cCegQIABAA&oq=%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD+kysl%C3%ADk+vs+dus%C3%ADk+material&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJzoCCAA6BAgAEB46BggAEAgQHjoECAAQGFC9uAFYysACYKvEAmgBcAB4AYAB9QiIAZM8kgEPMC4yMy4xMC4xLjEuNy0xmAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1

pbWc&scient=img&ei=F6D0XozpHozpsAfZ44yIBA&bih=647&biw=643&rlz=1C1SQJL_csCZ804CZ804#imgrc=D_nLZ4IRqL_vMM&imgdii=CKHwwoOgcUVLhM

- [44] BRANISLAV LACKO, LADISLAV MAIXNER, PAVEL BENEŠ, LADISLAV ŠMEJKAL. *Automatizace a automatizační technika: systemové pojetí automatizace 1.*, vyd. Praha :Computer Press,2000. 1. vyd. 97 s. ISBN 80-7226-246-7
- [45] URBÁNEK, JIŘÍ. *Automatizace výrobních procesů – obrábění.* vyd. Brno: VUT Brno,1990. 1. vyd. 165 s.
- [46] *Wikipedia* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Automatizace>
- [47] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/clanek/ochrana-automatizovanych-systemu-rizeni-technologickych-procesu--5246>
- [48] RADHAKRISHNAN, P., S. SUBRAMANYAN a V. RAJU. *CAD/CAM/CIM.* 3rd ed. New Delhi: New Age International Publishers, 2008. 692 s. ISBN 978-8-122-42236-8.
- [49] GROOVER, Mikell P.. *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing.* 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2008. ISBN 01-323-9321-2.
- [50] *FANUC* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/zakladni-pojmy-z-automatizace-32-terminu-ktere-musite-znat/>
- [51] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/STT4_7-NC_a_CNC_stroje.pdf
- [52] SADÍLEK, Marek. *Počítačová podpora výroby* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 80 s. [cit. 2015-09-10]. ISBN 978-80-248-2738-4. Dostupné z: <http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijniliteratura/Pocitacova-podpora-vyroby.pdf>
- [53] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/vyrobní-systemy-pro-zpracování-plechu.html>
- [54] *Wikipedia* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8C%C3%ADslicov%C3%A9_%C5%99%C3%ADzen%C3%AD
- [55] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/ridici-systemy-cnc-stroju-poznejte-ruzne-typy-rizeni/>

- [56] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.lvdgroup.com/en/products/laser-cutting-machines/used-impuls-12530-6kw?fbclid=IwAR16DSfu7T4JwnoSeZBxi7oqljW0h289oxNiHYRSr82e_rjQ1hMMOnsUfPA
- [57] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://products.esab.com/ESABImages/Cutting_systems_prehledA.pdf
- [58] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://dovoz-stroju.cz/wp-content/uploads/2017/05/01-_laser_cutter.jpg
- [59] [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://surplusrecord.com/cgi-bin/adpop.pl?943926>
- [60] *CITACE PRO* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/dokument/DJzO8OuOjG6ZLOui>

Seznam příloh

Příloha 1 Nákres a rozměry součásti (logo VUT)

