

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Petr Novák**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Milan Kalivoda**
Akademický rok: 2020/21

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:

Využití laserových strojů pro technologii řezání kovů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba na laserových strojích je mezi firmami poměrně rozšířená. Zadané téma přibližuje jednu z možných reálných situací.

Cíle bakalářské práce:

Charakteristika laserových strojů.
Sortiment součástí vhodných pro tyto stroje.
Vytipování konkrétní reálné situace.
Doložení TPV dokumentace.
Zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HLAVENKA, Bohumil. Manipulace s materiálem: Systémy a prostředky manipulace s materiálem. 4. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2008. 163 s. ISBN 978-80-214-3607-7.

IMAI, Masaaki. Kaizen. 1. vyd. Brno: Computer Press, a. s., 2004. 272 s. ISBN 80-251-0461-3.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie (Advanced methods of material removal). 1. vyd. Košice: Vienala, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4.

MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-72-4283-1.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-72-4283-1.

SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 651. ISBN 0-19-514206-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá technologií laserového řezání a jejím využitím v průmyslu. Velká část práce tvoří teoretická řešení, zabývající se charakteristikou jednotlivých typů laserových strojů a jejich využitím pro průmyslové aplikace, především pro řezání kovů. Dále je práce zaměřena na teorii této technologie a vhodné materiály. Práce také pojednává o dvou firmách, které představují běžné podniky, využívající laserový stroj. Na základě průzkumu využití laserových strojů je dále, v rámci experimentální části práce, navržena výroba součástí.

Klíčová slova

laserový stroj, laserové řezání, CO₂ laser, vláknový laser, zakázková výroba

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with laser cutting technology and its use in industry. A large part of the work consists of theoretical research, dealing with the characteristics of individual types of laser machines and their use for industrial applications, especially for cutting metals. Furthermore, the work is focused on the theory of this technology and suitable materials. The work also deals with two companies, which represent typical use of a laser machine. In the experimental part of this thesis the manufacturing process of component is created based on a survey of the use of laser machines.

Key words

laser machine, laser cutting, CO₂ laser, fiber laser, custom production

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁK, Petr. *Využití laserových strojů pro technologii řezání kovů*. Brno 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. **64 s. 3 přílohy**. Ing. Milan Kalivoda

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Využití laserových strojů pro technologii řezání kovů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

21.05.2021

Petr Novák

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ	5
OBSAH	6
ÚVOD	8
1 LASEROVÉ STROJE	9
1.1 Základní princip laserových strojů	9
1.2 Rozdělení laserových strojů z hlediska využití v průmyslu	12
1.3 Typy laserů využívané v průmyslových aplikacích	14
1.3.1 Vláknový laser	14
1.3.2 CO ₂ laser	15
1.3.3 Nd:YAG laser	16
1.3.4 Diskový laser	17
1.3.5 Diodový laser	19
2 LASEROVÉ ŘEZÁNÍ	20
2.1 Základní princip	20
2.2 Mechanismy laserového řezání	21
2.2.1 Tavné řezání	21
2.2.2 Oxidační řezání	22
2.2.3 Sublimační řezání	22
2.3 Parametry ovlivňující laserové řezání	23
2.3.1 Vyhodnocování jakosti tepelného dělení a vady při laserovém řezání ..	25
2.3.2 Vliv vybraných procesních parametrů na řezný proces	27
2.4 Vliv laserového zdroje na účinnost řezného procesu při obrábění kovů ..	28
3 MATERIÁLY VHODNÉ PRO LASEROVÉ OBRÁBĚNÍ	31
3.1 Nelegované a nízkolegované oceli	31
3.2 Vysokolegované oceli	31
3.2 Slitiny hliníku	32
3.3 Slitiny Mědi	33
3.4 Titanové slitiny	33
4 VYUŽITÍ V PRAXI	34
4.1 Názorné příklady využití laserových strojů ve firmách	34
4.1.1 FARMTEC a.s.	34

4.1.2	DITA výrobní družstvo invalidů	38
5	Návrh výrobního procesu	41
5.1	Používané polotovary.....	41
5.2	Vstupní údaje	43
5.3	Postup výroby navržené součástky.....	45
5.4	Příprava výroby zakázky	47
5.5	Vyhodnocení	47
5.5.1	Využití materiálu při laserovém řezání.....	47
5.5.2	Výrobní čas při laserovém řezání	48
	ZÁVĚR	51
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	52
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	60
	SEZNAM PŘÍLOH.....	61

ÚVOD

Obrábění laserovým paprskem, do kterého patří dělení, řezání, vrtání či značení materiálu, tvoří již velmi důležitou a stále se rozšiřující nekonvenční metodu zpracovávání materiálů v průmyslu. Laserová zařízení, určená k řezání a dělení materiálu, pro svoje rozsáhlé široké uplatnění tvoří nejdůležitější technologii z této kategorie.

Počátek využití laserových technologií v průmyslu se datuje do roku 1965, kdy byl firmou Western Electric Company vyvinut první laserový stroj pro vrtání diamantových raznic. Zásadní průlom pro technologii laserového řezání následoval v roce 1967, kdy byl ve Velké Británii úspěšně vyvinut první plynový CO₂ laser s účelem řezat ocelový plech. S dalším vývojem těchto strojů, nedlouho poté, následovalo jejich postupné rozšíření. [57]

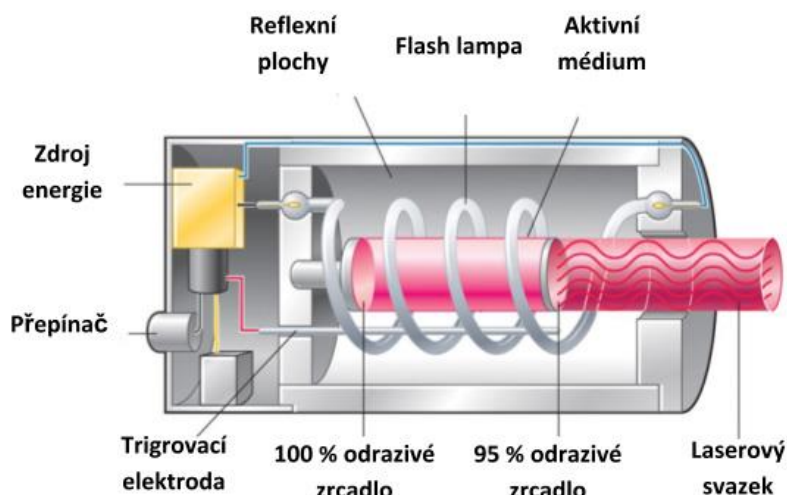
V dnešní jsou tyto stroje v průmyslu využívány od malých podniků, které si je pořizují především k řezání kovových plechů pro kusovou výrobu, po výrobce automobilů, kteří pomocí nich obrábí složité tvářené dílce s nasazením robotů. Je tomu tak pro výhody vycházející z podstaty laserového paprsku, mezi které patří bezkontaktní obrábění a tedy absence opotřebením nástroje, vysoká přesnost, umožňující řezat i velmi složité kontury či malá tepelně ovlivněná oblast. Jako jeden nejzásadnějších faktorů pak lze uvést možnost efektivně obrábět všechny nejpoužívanější materiály ve strojírenství a také možnost řezat běžnými třískovými metodami materiály velmi těžko obrobitelné jako jsou titanové či niklové slitiny.

1 LASEROVÉ STROJE

1.1 Základní princip laserových strojů

K dosažení mimořádných světelných vlastností, jaké laser nabízí, je za prvé zapotřebí médium neboli tzv. aktivní látku, a to buď plynnou, složenou z jednoho či směsice plynů, pevnolátkovou či kapalinovou. Zjednodušeně lze říci, že je to v případě laseru látka, která dokáže absorbovat dodanou energii a za fungování principů stimulované emise, jež předpověděl Albert Einstein ve své práci z roku 1917, potom emitovat elektromagnetické záření. Příkladem aktivního prostředí v přírodě může být proces luminiscence u drahokamů, kde díky absorpci slunečního záření dojde k jejich vlastnímu vyzařování světla v podobě třpytu. Jinými slovy dojde k excitaci (vybuzení) atomů a jejich návratu do základního energetického stavu za vyzáření fotonů. V případě prvního funkčního sestaveného laseru bylo médium pevnolátkové, použit byl krystal rubínu s tvarem válce, zkonstruovaný v roce 1960 Theodorem Maimanem. Jeho základní prvky jsou na obrázku č. 1.1. [1]

Dále je zapotřebí dostatečně silný zdroj záření, kvůli dodání energie elektronům v aktivním prostředí, což u prvního laseru byla xenonová výbojka obklopující rubín. Konkrétní zdroj buzení se odvíjí od složení laserového média. Plynné médium je ve většině případů buzeno elektrickým výbojem či stejnosměrným nebo střídavým proudem. Pevné médium je buzeno nejčastěji diodami či výbojkami. [1, 2]



Obr. 1.1 Schéma rubínového laseru [3]

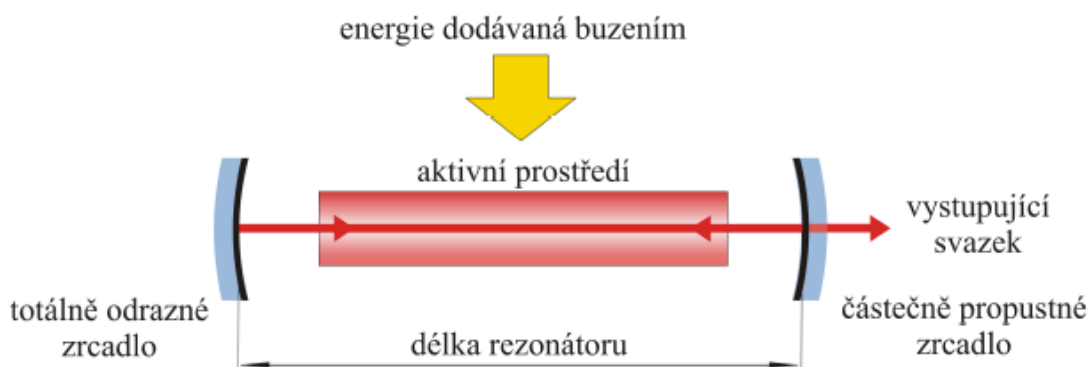
Spojením média a zdroje energie vznikají interakce, tvořící základ k vytvoření laserového paprsku, které jsou ve formě akronymu v samotném názvu slova laser a zní Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesilování světla stimulovanou emisí záření.

Stimulovaná emise

Vyzářené světlo ze zdroje záření, např. výbojky, opakovanými silnými záblesky najednou vybudí velké množství elektronů v aktivním prostředí do tzv. vybudzeného stavu a během milisekund se vrátí do svého původního stavu za vyzáření dalších fotonů. Tyto nově vzniklé fotony potom stimulují některé právě vybudzené atomy a vzniknou tak další fotony o stejných parametrech. Jinak řečeno přinutí některé atomy vyzářit další fotony, které potom mají směr, frekvenci a fázi totožnou s tím, který jej stimuloval. Dochází tedy ke zvětšení počtu fotonů, unikajících do všech směrů. [4, 5]

Princip rezonátoru

Účinek stimulované emise se mnohonásobně zvýší přidáním rezonátoru k aktivnímu prostředí, jenž slouží k zesílení záření. Rezonátor je v případě většiny laserů soustava minimálně dvou zrcadel usazených rovnoběžně na konce média. Jedno postříbřené nepropustné tvořící téměř dokonalé zrcadlo s odrazivostí až 99,9 % a druhé polopropustné, které zajišťuje průchod vytvořeného světelného svazku. Průměr a zakřivení těchto zrcadel dále určuje divergenci laserového paprsku. Fotony, zákonem odrazu, letící nerovnoběžně na osu rezonátoru unikají a ty, které letí rovnoběžně se dále stimulují (zvětšují svůj počet) a dochází tak k požadovanému zesílení světla s koherentním vlněním. [4, 6]



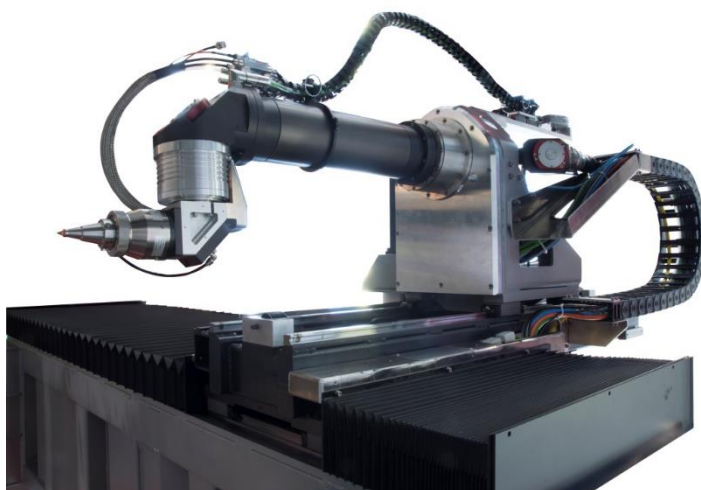
Obrázek 1.2 Základní části laseru [7]

Základní části průmyslových laserových strojů

U laserových strojů, využívaných v průmyslu, je třeba zmínit další důležité části ze kterých se skládají. Je tím laserová hlava, umožňující dopravu laserového svazku na materiál. Laserové stroje, používané např. pro řezání, se vyznačují velikou přesností řezu, je proto zásadní dodržet určitou kvalitu a průměr laserového svazku. To se ve většině případů docílí pomocí optické soustavy neboli tzv. expandéru, což je systém zrcadel a čoček u plynových laserů, nebo za pomoci optických vláken u dalších typů laseru. Parsek je následně veden do laserové hlavy. [7, 8]

Zařízení se neobejde bez chladicího zařízení, sloužícího ke snížení tepla vzniklého energetickými ztrátami buzení, především v rezonátoru a také optické soustavě a laserové hlavě, kterými paprsek prochází. Řešení je většinou provedeno prouděním chladicí kapaliny, nejčastěji demineralizovanou vodou. Nedílnou součástí CNC strojů musí být řídicí počítač, obsahující software pro ovládání všech volitelných parametrů laseru. Také se jím ovládá vzájemný pohyb pracovního stolu a laserové hlavy a zavírání laserové závěrky. [7, 8]

V průmyslových aplikacích se tyto jednotlivé části spojují do kompaktního celku uspořádaném na rámu, nazývaného laserové stanice, které disponují soustavou pracovních lineárních a rotačních os nebo robotů a manipulátorů, sloužící k vytváření vzájemného pohybu dílu a laserové hlavy. Na obrázku 1.3 je ukázka pětiosého řezacího zařízení a na obrázku 1.4 detail laserové řezací hlavy [8]



Obrázek 1.3 3D řezací stroj [9]



Obrázek 1.4 Laserová řezací hlava [10]

1.2 Rozdělení laserových strojů z hlediska využití v průmyslu

Laserové stroje lze rozdělovat dle mnoha kritérií a vlastností, mezi nejzákladnější patří dělení dle jejich aktivního prostředí, režimu práce či vyzařované vlnové délky. Dále je lze rozlišovat například dle způsobu buzení aktivního prostředí. Následuje rozdělení laserů s ohledem na využití ve zpracovatelském průmyslu.

Dle prostředí aktivního media laseru [11, 12, 13]:

- Plynné, které lze dělit na:
 - S neutrálními atomy (nejčastější je Helium-neonový laser),
 - Iontové (například Argon-iontový laser),
 - Molekulární (nejzákladnější je CO₂ laser).

- Pevnolátkové, které lze dělit na:
 - tyčové,
 - polovodičové,
 - vláknové,
 - diskové.

- Kapalinové

Ve výrobním průmyslu se v současnosti využívají výhradně plynné a pevnolátkové lasery, ze kterých nejčastěji CO₂, vláknový, diskový a polovodičový laser. Další plynový laser, který by měl být zmíněn je excimerový, jenž se využívá například při zpracovávání polovodičových čipů. Kapalinový laser, jehož aktivním prostředím je organického barviva, není v průmyslu rozšířen.

Dle režimu práce [11, 14, 15, 16, 17]:

- Lasery pulsní, s dobou trvání pulsů řádově:
 - milisekundy (10^{-3} s)
 - mikrosekundy (10^{-6} s)
 - pikosekundy (10^{-12} s) až femtosekundy (10^{-15} s)

Pulsním režimem je myšleno vyzařování laserového svazku ve velmi krátkých pulzech o vysoké energii, většinou značící pulzy s jejich konstantním opakováním, o frekvencích až řádově ve stovkách kHz, v tzv. Q – spínání s nanosekundovými pulsy.

Lasery v tomto režimu se v dnešní době využívají především při mikroobrábění, gravírování a ručním svařování či navařování drobných součástí. U těchto technologií je značně snižena tepelně ovlivněná zóna, což vychází z jejich velmi krátké doby působení svazku na materiál. V současnosti jsou pro technologie mikroobrábění a značení nejvíce rozšířené pevnolátkové pulzní lasery se středním výstupním výkonem od desítek do stovek W a vlnovou délkou okolo 1000 nanometrů. Používají se pro celou řadu materiálu jako je sklo, technické keramiky, i pro zpracovávání diamantových nástrojů, kde se používají pulzy s dobou trvání v jednotkách ps a méně, také nazývané ultrakrátké pulzy. V případě povrchových úprav jako např. čištění či odstraňování povrchových vrstev, jsou využívány nanosekundové vláknové pulzní lasery se středními výkony od 100 W do několika kW.

- Lasery s kontinuálním výkonem (CW)

Jedná se o lasery pracující s nepřetržitým vyzařováním paprsku o stálé intenzitě. Zkratka CW vychází z anglického označení continuous wave. V průmyslu se využívají stroje s výkony od jednoho do desítek kW. Jedná se o nejpoužívanější režim ve výrobě, u aplikací jako řezání, svařování a kalení. Tyto stroje lze dělit dle výkonu na:

- Malé výkony (od 10^{-3} W do 10^3 W)
- Velké výkony (od 10^3 W do 10^5 W)

Dle vlnové délky [11, 18, 19, 20]:

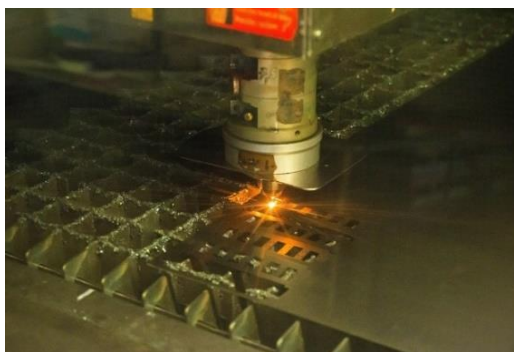
- Infračervené (780 nm až 1 mm)
- Viditelné (390 nm – 760 nm)
- Ultrafialové (10 nm – 360 nm)
- Rentgenové (10 nm – 1 pm)

Vlnová délka je velmi důležitý parametr výstupního laserového svazku, jelikož má zásadní vliv na pohltivost zpracovávaného materiálu. Příklady důležitých vlnových délek používaných v průmyslu:

- (9 300 až 10 600) nm u plynových CO₂ laserů
- 1064 nm u pevnolátkového tyčového Nd:YAG a vláknového laseru
- (1030 a 1050) nm u diskových Yb:YAG laserů
- (900 až 980) nm u polovodičových diodových laserů pro řezání

1.3 Typy laserů využívané v průmyslových aplikacích

Nejzásadnější rozdělení laserů obecně a s ohledem na jejich využití v průmyslových aplikacích je dle prostředí aktivního média, přičemž jednotlivé typy mají své výhody, nevýhody a vhodnosti pro konkrétní aplikace, které se v případě laserů ve strojírenství často prolínají. S vývojem modernějších a účinnějších typů, jako je laser vláknový, diskový a diodový, však v dnešní době dochází k častému nahrazování starších typů, které se na trhu již takřka nenacházejí. Pro řezání kovů, které představuje nejrozšířenější průmyslovou laserovou technologii a na které je tato bakalářská práce blíže zaměřena, se v současnosti nejvíce využívají plynové CO₂ a pevnolátkové vláknové lasery. Konkrétně se jedná o především o 2D řezání plechů (obr. 1.5). Následuje pojednání o jednotlivých typech laserů, které mají uplatnění ve strojírenství. [15]



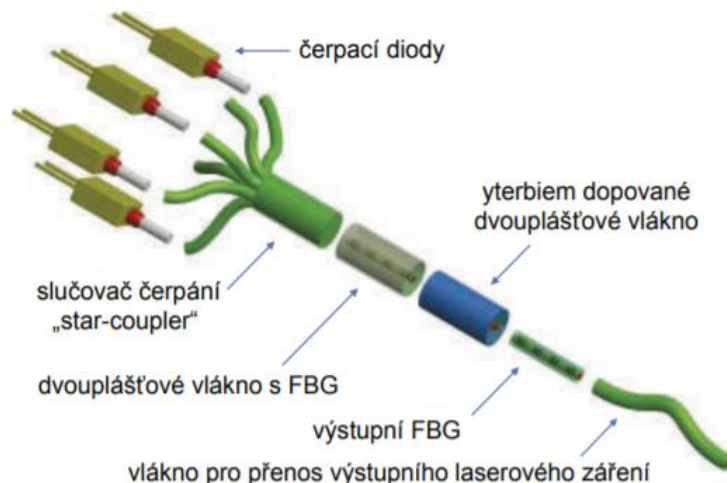
Obrázek 1.5 Řezání tabule plechu CO₂ laserem [21]

1.3.1 Vláknový laser

Tento v dnešní době nejrychleji se rozšiřující typ průmyslového laseru s výbornou kvalitou paprsku a chlazením, který za svůj rozmach vděčí telekomunikacím, je dnes universálním nástrojem, jímž lze pokrýt široké spektrum strojírenských aplikací, od pulsních laserů s výkony v desítkách W pro mikroobrábění či gravírování, po vysoce výkonné stroje v řádech až desítek kW, které v dnešní době zaujaly významné místo v oblasti obrábění a svařování. [22]

Aktivní prostředí tohoto typu laseru tvoří optická vlákna, která jsou v jádře dopovaná aktivními prvky vzácných zemin, nejčastěji erbiem, ytterbiem či thuliem, kde dochází k zesilování záření. Energie je dodávána budícími laserovými diodami, přenášející světelný tok do vnějšího optického vlákna, které dále budí nízko výkonným laserovým paprskem vnitřní vlákno, v němž se nachází některý ze zmiňovaných prvků. Jedná se o provedení čerpání aktivního prostředí přes plášť, jehož komponenty jsou znázorněny na obrázku č. 1.6. Následně v něm vzniká výstupní laserový paprsek s mnohonásobně zvětšenou energií. Namísto rezonátoru, fungujícího na principu mechanických zrcadel, jenž slouží například u Nd:YAG laserů k dalšímu zvětšení a usměrnění energie, jsou velmi častým řešením tzv. Braggovské mřížky (anglicky Fiber Bragg grating – FBG), což jsou struktury

vytvořené na jádře, vytvářející periodické změny indexu lomu, které zastupují funkci zrcadel, kdy odráží jen danou vlnovou délku. [23, 24]



Obrázek 1.6 Komponenty pláštěm čerpaného vláknového laseru [23]

Důvody jejich širokého využití a velikého rozvoje pak vyplývají z jeho samotného principu a uspořádání. V první řadě jsou kompaktní a spolehlivé z důvodu vedení dlouhými optickými vlákny, absence speciální optiky a nastavování rezonátorů, což je nutností např. u Nd:YAG laserů. Dále u nich není třeba složité chlazení, jelikož poměr plochy pláště je vůči celkovému objemu veliký, je tedy dostačující chlazení vzduchem. S tím souvisí jeho poměrně vysoká účinnost, která díky schopnosti budících diod efektivně konvertovat energii, u průmyslových laserů dosahuje až 35 %. Výborná je i kvalita jeho svazku s velmi malou rozbíhavostí, umožňující zaostření do velmi malého bodu, což umožňuje jeho použití i ve velmi přesných aplikacích. [23, 24]

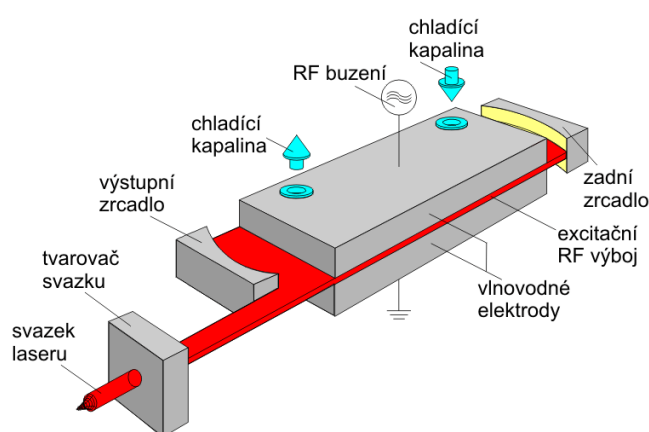
Jak už bylo naznačeno výše, vláknové lasery našly mimo jiné své významné uplatnění u nejrozšířenější laserové aplikace, čímž je řezání. Konkrétně pak u obrábění tenkých plechů, kde velmi často dochází k nahrazování dříve používaných CO₂ laserů. Dále je spolu s Diodovým laserem hojně zastoupený u svařování a v nemalé míře také u aplikací s pulzním režimem jako jsou povrchové úpravy, například leštění, odstraňování povrchových vrstev kovů a v dnešní době především i u přesných technologií jako mikroobrábění a gravírování. [15, 25, 26]

1.3.2 CO₂ laser

Tento již dlouho používaný laser v průmyslu s plynovým aktivním prostředím má stále velmi významné postavení v oblasti zpracování nekovových materiálů a řezání silnějších kovů, a je dnes i přes jeho časté nahrazování účinnějšími typy laserů stále velice důležitý nástroj, hojně využívaný strojírenskými podniky i pro aplikace jako svařování kovů a značení.

Aktivní prostředí tvoří směsice plynů, zahrnující aktivní plyn CO_2 a další pomocné prvky, sloužící ke zlepšení podmínek vzniku stimulované emise. Důležité jsou především dusík a helium, dále pak vodík. V principu fungují díky plynům v uzavřené trubici, které jsou excitovány elektrickým výbojem nebo radio-frekvenčně (RF), kde následně díky rezonátoru se dvěma zrcadly, zafunguje princip již vysvětlované stimulované emise, čímž dojde k vyzařování koherentního laserového paprsku polopropustným zrcadlem. V průmyslových aplikacích je pak rozšířené provedení kompaktních tzv. Slab laserů, jejichž buzení je provedeno velkoplošnými měděnými elektrodami radiofrekvenčním vlněním, kde díky velkým plochám elektrod dochází ke chlazení odváděním zbytkového tepla difúzí (viz obr 1.7). [27, 28, 29]

Důvody jejich rozsáhlého využití především při řezání větších tlouštěk kovů vychází z možnosti dosažení velmi vysokých výkonů, dnes až 25 kW, běžně pak jednotek kW. Časté jsou i laserové zdroje v řádech výkonů od desítek až stovek W pro značení a řezání nekovových materiálů. Další zásadním důvodem je jeho unikátní vlnová délka, která je v rozmezí od 9 do 11 μm , nejčastěji 10 600 nm, umožňující efektivně zpracovávat organické materiály jako dřevo, papír a sklo nebo plasty. Jeho nevýhodou je poměrně nízká účinnost, pohybující se v rozmezí 6–10 %, která znamená, že u vysokovýkonných CO_2 laserů pro řezání a svařování kovů je vyžadován značně větší výkon pro stejnou aplikaci než např. u vláknových laserů. Má tudíž větší provozní náklady, ve kterých hraje roli i velká spotřeba plynu a jeho logistika. Navíc je často třeba úpravy povrchu před svařováním, např. černěním. Další zásadní nevýhodou je nemožnost vést laserový paprsek optickými vlákny do laserové hlavičky, je nutné použití zrcadel, přivádějící řadu problémů a také komplikaci při snaze o jeho zavedení v průmyslových robotech. [11, 15, 17, 27, 30, 31]



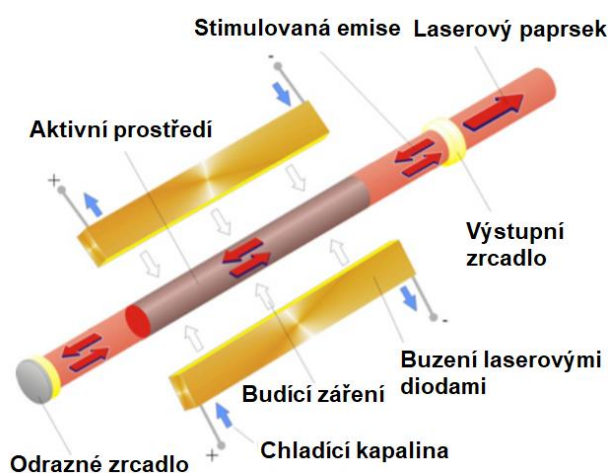
Obrázek 1.7 Schéma CO_2 Slab laseru [32]

1.3.3 Nd:YAG laser

Tento nejstarší nasazený laser v průmyslu s krystalovým aktivním prostředím má díky jeho vlastnostem široké spektrum možného využití ve strojírenství, jako je značení, vrtání, řezání a svařování, avšak v dnešní době, vzhledem ke stejným

možnostem použití a výhodnějším vlastnostem laserů vláknových a diskových, jsou již tyto lasery z velké části nahrazeny. [15, 32]

Tento laser spadá do skupiny pevnolátkových krystalových laserů s příměsí vzácných prvků, ze které je nejpoužívanějším typem. Konkrétní aktivní prostředí je izotropní krystal yttrito-hlinitého granátu (zkratka YAG) s příměsí Neodymu. Emituje vlnovou délku záření nejčastěji o 1064 nm, tedy shodnou s vláknovým laserem, která je vhodná ke zpracovávání kovových materiálů i s vysokou odrazivostí. Starším, méně efektivním typem jeho buzení, je kryptonovými výbojkami, ale především z důvodu velkých tepelných ztrát bylo toto řešení nahrazeno čerpáním bloky laserových diod, viz. obrázek 1.8, s účinností čerpání aktivního prostředí až 45 % a značně vyšší životností. [7, 33]



Obrázek 1.8 Schéma lampami buzeného Nd:YAG laseru [7]

Tyto lasery mohou pracovat v pulzním nebo kontinuálním režimu, přičemž v CW režimu dosahují maximálního výkonu pouze do několika stovek W. V pulzním režimu při malých středních výkonech a vysoké intenzitě paprsku dosahují v porovnání s CO₂ lasery užší tepelně ovlivněné zóny, s použitím vysokých špičkových výkonů, je tudíž možné efektivně řezat tenké plechy. Využití Laserů, čerpanými diodami je především právě v pulzním tzv. Q-spínaném režimu s pulsy v řádech ns s průměrným středním výkonem do 100 W, zejména pro značení a gravírování. Stejně jako u vláknových laserů, díky jejich kompaktnějším rozměrům a menší vlnové délky, je možné laserový paprsek do laserové hlavy přenášet optickými vlákny. Tyto zmíněné výhody však nabízí i vláknový laser, který je pro své výhody, vyplívající z jeho spolehlivějšího uspořádání, větší účinnosti a efektivity, pro většinu případů vhodnější varianta. Tyto důvody vedly k častému nahrazování Nd:YAG laseru pro průmyslové aplikace. [34, 35, 36]

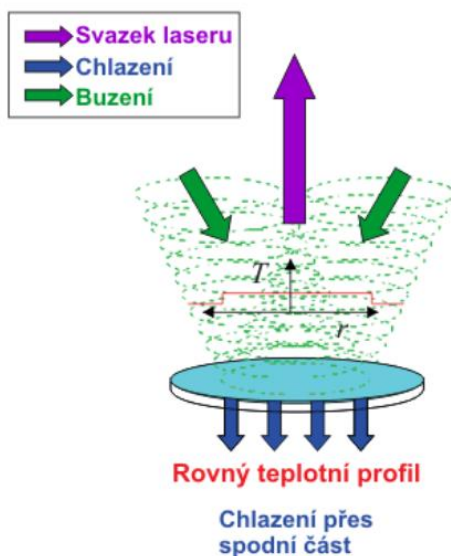
1.3.4 Diskový laser

Dalším typem, který našel své uplatnění v průmyslu je poměrně nová a v současnosti velmi perspektivní modifikace pevnolátkových krystalových laserů

s malým diskem jako aktivním prostředím, který především oproti starším pevnolátkovým laserům a plynovým laserům nabízí u průmyslových aplikací množství výhod.

Aktivní prostředí je krystal, s příměsí prvků vzácných zemin, nejpoužívanější je YAG krystal, dopovaný ytterbiumem, s označením Yb:YAG. Má tvar malého disku s tloušťkou podstatně menší než je průměr laserového paprsku, a průměry v jednotkách mm, přičemž buzení probíhá pomocí diod. Zjednodušený princip je zobrazen na obr. č. 1.9, kdy na jedné straně disku je reflektivní povrch, získaný dielektrickým povlakem, který slouží jako odrazné zrcadlo, a na druhé straně je disk, připevněný ke chladiči. [37, 38]

Díky jeho malé tloušťce a uspořádání laseru se dosahuje efektivního chlazení a vysoké kvality paprsku. Další výhodou je možnost dosažení většího výkonu a vyšší energie pulzů než v případě tyčového, vláknového nebo Slab (deskového) provedení laseru, avšak se zvyšujícími se výkony se zdatně snižuje kvalita paprsku. Yb:YAG emituje vlnovou délku nejčastěji o 1030 nm, používají se však i jiné krystaly dopované tímto prvkem s vyzařováním jiných vlnových délek. Diskové lasery mají ve strojírenství univerzální využití, velmi podobné konkurenčním vláknovým, a jsou vhodné pro kontinuální i pulzní režimy s rozmezí výkonů od desítek W do desítek kW. [37, 39]

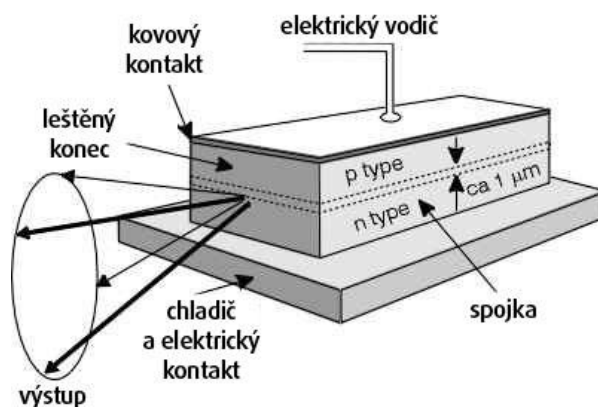


1.3.5 Diodový laser

Jedná se o nejrozšířenější typ laseru vůbec se širokým spektrem využití od aplikací v běžném životě, jako čteček čárových kódů, DVD přehrávačů, součástí laserových tiskáren po vědecké užití, kde se využívá např. u molekulární spektroskopie.

Aktivní prostředím je krystal obsahující polovodičový PN přechod, kde se díky průchodu elektrického proudu část energie přeměňuje na světlo. K tomu dochází injekcí aktivních částic – elektronů a děr neboli tzv. volných nosičů náboje, čímž dojde ke vzniku stimulované emise. Vytvořením kolmých stěn na tento přechod, přesným opracováním krystalu se vytvoří tzv. Fabry-Perotův rezonátor. Nejčastěji používaným polovodičem je Arsenid Gallitý (GaAs), generující laserový svazek o vlnové délce 840 nm, často používaný pro buzení pevnolátkových laserů. [7, 41, 42]

Mezi zásadní výhody tohoto laseru patří jeho kompaktnost, nízká hmotnost, dlouhá životnost a vysoká účinnost se kterou souvisí poměrně nízké provozní náklady. Přímé použití tohoto laseru pro řezání a svařování bylo ovšem mnoho let omezeno nízkou kvalitou svazku s velkou rozbíhavostí. Tato skutečnost se ovšem v posledních letech změnila, vzhledem k jejich neustálému vývoji a zlepšení kvality paprsku. Využívá se u povrchových úprav jako je navařování a kalení, nebo u řezání a svařování plastů a kovových fólií, případně pro pájení. V dnešní době se také, mimo jiné díky jednoduchosti jejich provedení, rozšiřují vysokovýkonné diodové lasery od 2 do 4 kW i pro řezání tenkých kovů, kde dosahují poměrně vysokých rychlostí řezání. [15, 43, 44, 45]



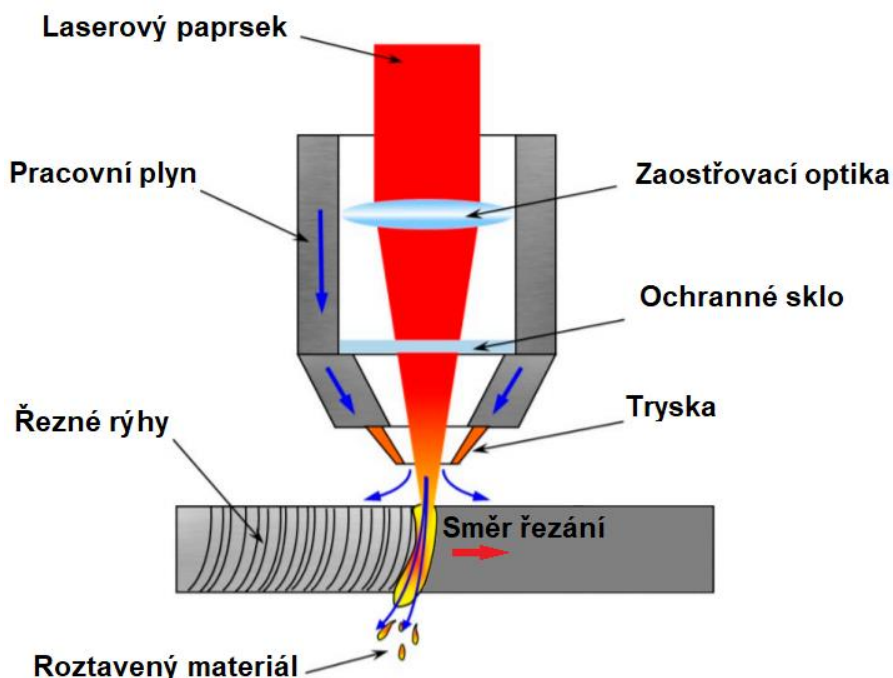
Obrázek 2.0 Schéma diodového laseru [32]

2 LASEROVÉ ŘEZÁNÍ

Jak již bylo vícekrát naznačeno, využití laserových strojů ve strojírenském průmyslu v dnešní době zdaleka přesahuje řezání kovů, které se jako nejvýznamnější technologie laserového zpracování začala využívat již v 60. letech 20. století. S vývojem účinnějších, výkonnějších či kompaktnějších laserů se jejich využití od minulého století značně rozšířilo. Pro zpracování materiálu lze v současnosti jeho využití rozdělit na makro procesy, do kterých spadá řezání, navařování, které se dělí na laserové slévání, glazování a plátování, dále svařování, pájení atd. A mikroobrábění, do kterého lze zařadit strukturování, úběr materiálu, vrtání atd. Ač tedy řezání tvoří jen zlomek aplikací, u kterých je laser nasazen, je tou nejrozšířenější technologií laserového zpracování. [46, 47]

2.1 Základní princip

K úběru materiálu zde dochází bez fyzického kontaktu s nástrojem, termální energií laserového paprsku. Pohyb koná buď paprsek, nebo polotovar, řídicí se CNC programem. Paprsek v řezné hlavě, po zaostření čočkou na danou výkonovou hustotu, prochází tryskou pod proudem pracovního plynu, který při řezání odnáší materiál ze spáry a zabraňuje poškození zaostřovací čočky, odstříkovanou struskou. Základní princip je zobrazen na obr 2.1. [48]



Obrázek 2.1 Princip laserového řezání [49]

2.2 Mechanismy laserového řezání

S ohledem na mechanismus úběru materiálu lze laserové řezání rozdělit na tři základní principy. Jejich volba závisí především na druhu materiálu a jeho tloušťce. Při zpracovávání kovových materiálů se rozlišují dva základní způsoby, jímž je řezání tavné a oxidační. Asistenční pracovní plyny lze, dle těchto metod, dělit na inertní a aktivní.

2.2.1 Tavné řezání

Jedná se o metodu laserového řezání, která spočívá v lokálním nahřátí materiálu v místě fokusace paprsku, až dojde k jeho roztavení a vytvoření počátečního zápichu. Roztavený materiál se za pomoci inertního plynu, proudícího souose k paprsku a pod vysokým tlakem, vyfoukne ze spáry a následně započne proces řezání. Inertní plyn nereaguje s roztavovaným kovem, řezná energie se dodává pouze laserovým paprskem. [17, 50, 51]

Inertním plynem je nejčastěji dusík nebo argon, a kromě zmíněného vyfukování kovu při řezání, slouží ke chlazení řezné hrany a ochraně před vznikem oxidace, čímž odpadá nutnost hrany dále obrábět. Při této metodě se dosahuje dobré kvality řezu, jejíž ukázka je na obr. č 2.2. Je ovšem nutností značně vyššího výkonu laseru a přiváděného tlaku než v případě oxidačního řezání k dosažení stejné rychlosti řezání. Plyn, u kterého je nutná velmi vysoká čistota, je tryskou přiváděn až 30 bary u materiálů jako nerezová ocel a slitiny hliníku, z důvodu odstranění vzniklých roztavených oxidů s vysokou viskozitou. Zpracovávané materiály, tímto způsobem, jsou často již zmiňované korozivzdorné oceli, slitiny hliníku a pozinkované plechy. [50, 51, 52, 53]



Obrázek 2.2 Součásti vyrobené tavným řezáním [51]

2.2.2 Oxidační řezání

Princip této metody je podobný tavnému řezání, kdy pomocí laserového paprsku a proudícího reaktivního plynu, jímž je kyslík, dochází k nahřátí materiálu na teplotu vznícení až dojde k jeho spalování. Na rozdíl od tavného řezání, kyslík působí jako aktivní plyn, který díky exotermické reakci železa a kyslíku, dodává dodatečnou energii řeznému procesu. Zároveň, jako u tavného způsobu, svým mechanickým působením odstraňuje zoxidovanou taveninu. [52]

Díky tomuto principu je účinnost procesu vyšší a potřebný výstupní tlak kyslíku se pohybuje jen okolo 1 do 5 bar. Je opět nutností jeho vysoké čistoty, která je pro komerční účely více než 99,95 %. V případě kontaminace dochází ke snižování rychlosti řezání. Řezný proces díky exotermické reakci umožňuje použití pro větší tloušťky materiálů, přesahující až 30 mm. Avšak kvůli kyslíku zde dochází ke vzniku tenké vrstvy oxidů (okují) na řezné hraně, kterou je většinou nutné opracovat. Toto působí problém, když se polotovar následně lakuje, může totiž dojít k odlupování vrstvy oxidů po řezné hraně, a tím i laku. Nejvíce se používá pro běžné konstrukční oceli, dále pak pro materiály s vysokou tepelnou vodivostí, jako je měď. Ukázka kvality řezu je zobrazena na obr. č 2.3. [17, 50, 52]



Obrázek 2.3 Detail řezu konstrukční oceli tloušťky 3 a 12 mm, obrobené oxidačním řezáním [52]

2.2.3 Sublimační řezání

Při této metodě dochází k úběru materiálu jeho prudkým ohřátím do stavu, kdy dojde k sublimaci, kompletně bez, nebo s minimem tání materiálu. Při procesu se vytváří kovové páry, které jsou vyfukovány ze štěrbiny řezu. Stejně jako v případě tavného řezání, proudí do místa řezu inertní plyn, pomáhající vyfukovat páry a který slouží především k izolaci řezných hran od přístupu vzduchu. [54, 55]

K této metodě je zapotřebí pulzních laserů s vysokým špičkovým výkonem a krátkými pulsy. Samotné rychlosti řezání jsou pak menší než v případě předchozích metod. Jako inertní plyn se většinou používá argon a dusík a do místa řezu proudí s tlakem 1 až 3 barů. Díky principu této metody se dosahuje kvalitních a hladkých řezů. K zabránění kondenzace par na hranách řezu, nesmí být tloušťka materiálu větší než průměr paprsku. Metoda se tedy využívá pro jemné řezání tenkých materiálů jako jsou plastové a textilní fólie a na materiály, na které nelze použít tavnou metodu. [54, 55, 56, 57]

2.3 Parametry ovlivňující laserové řezání

Optimální nastavení podmínek laserového řezání je náročný úkol, jelikož do procesu vstupuje mnoho proměnných a faktorů ovlivňujících úběr materiálu a jeho vyfukování z řezné spáry. Lze je obecně rozdělit na parametry laserového paprsku, vlastnosti fokusační optiky, parametry asistenčního plynu a na vlastnosti obráběného materiálu. Pro vlastní proces laserového řezání je pak důležité uvést nastavitelné procesní parametry, jejichž volba výrazně ovlivňuje produktivitu a kvalitu řezu. Následuje přehled zásadních aspektů, ovlivňující řezný proces.

Laserový paprsek je určen:

- vlnovou délkou [ns],
- průměrem paprsku [mm],
- laserovým výkonem [W],
- módem paprsku (rozložením intenzity záření paprsku v příčném průřezu) [-],
- kvalitou laserového paprsku, definované parametrem BPP (beam parameter product [mm · mrad],
- polarizací (způsobem šíření vln elektromagnetického záření) [-],
- pracovním režimem – CW nebo pulsním, který je charakterizován:
 - délkou pulsu [s], pulsní frekvencí [Hz], energií pulsu [J] a překrytím pulsů [%]. [46, 58, 59]

Asistenční plyn hraje při obrábění zásadní roli, jelikož se při řezném procesu musí dosáhnout rovnováhy mezi tavením (či spalováním nebo sublimací) a vyfukováním pracovním plynem. V opačném případě dochází k výrazně zhoršené kvalitě řezu. Tlak plynu například významně ovlivňuje šířku řezné spáry, šířku tepelně ovlivněné zóny a velikost úhlu úkosu předního řezu od základní roviny. [46, 56]

Parametry asistenčního plynu:

- chemické složení, dle kterého lze nejpoužívanější plyny v závislosti na své funkci dělit na:
 - inertní – dusík, argon a helium,
 - reaktivní – kyslík a vodík,
 - kombinaci více plynů – vzduch (21 % O₂ + 78 % N₂ + 1 % Ar),
- hustota [kg·m³],
- viskozita [10⁶ kg·m⁻¹·s⁻¹],

- tlak [bar],
- použitá tryska, pro kterou je zásadní její:
 - geometrie,
 - průměr [mm],
 - vzdálenost od obrobku [mm]. [46, 60]

Narozdíl od třískového obrábění, jejichž obrobitelnost se určuje, mimo mnoha dalších důležitých faktorů, na mechanických vlastnostech materiálu jako je tvrdost, nemají tyto vlastnosti pro laserové řezání velkou důležitost, laserový paprsek efektivně obrábí jak měkké materiály jako dřevo či plasty, tak velmi tvrdé, jako např. slinuté karbidy či titanové slitiny. Za to více závisí na tepelných vlastnostech materiálu. Bylo proto nutné stanovit další vyhodnocované kritéria materiálů pro laserové obrábění, ze kterých je nejzásadnější pohltivost a tepelná vodivost. [2]

Materiálové vlastnosti ovlivňující řezný proces:

- pohltivost [%],
- tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],
- měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
- hustota [$kg \cdot m^3$],
- tepelná difuzivita [$m^2 \cdot s^{-1}$],
- součinitel teplotní roztažnosti [-],
- přechodové teploty [C°],
- měrné skupenské teplo tání [$J \cdot kg^{-1}$],
- měrné skupenské teplo varu [$J \cdot kg^{-1}$]. [46, 59]

Správné nastavení následujících parametrů nejvíce ovlivňuje hodnotu optimální rychlosti řezání v závislosti na dosažené kvalitě řezu. V rámci této práce se bude dále detailněji zabýváno některými ovlivnitelnými procesními parametry.

Nejzásadnější procesní parametry při laserovém řezání:

- Výkon laseru,
- Rychlost řezání,
- Použitý pracovní plyn,
- Poloha ohniska vzhledem k horní ploše obrobku,
- Geometrie trysky a její vzdálenost od obrobku. [49]

2.3.1 Vyhodnocování jakosti tepelného dělení a vady při laserovém řezání

Jakost povrchu řezu při tepelném dělení se dle normy ČSN EN ISO 9013 určuje podle úchylky kolmosti nebo úchylky úhlu (značka u) a průměrné výšky prvku profilu (značka $Rz5$). Dodatečně se může použít veličina skluz (n), natavení horní hrany (r) a výskyt okujů na dolní hraně řezu. [61]

Při tepelném dělení nevyhnutelně vznikají vady, některé snadno spatřitelné pouhým okem, jejichž dopad lze zmírnit správným nastavením procesních podmínek. Následuje výpis a vysvětlení vad řezu a veličin, určujících kvalitu řezu pro laserové řezání.

Okuje (Otřepy)

Přilnuté zbytky kovu či ztuhnuté oxidy na spodní hraně řezu s různou přilnavostí a výškou, jejíž výskyt závisí na správnosti nastavení řezných podmínek. Mohou být ve formě podlouhlých kapek nebo zdrsňené ostré vrstvy. [61, 62]

Šířka řezné spáry

Vyhodnocuje se jako délka spáry řezu na horní ploše obrobené součásti či v případě natavení horní hrany, pod tímto natavením. Běžně je užší na dolní hraně řezu a má mírně větší průměr než fokusovaný paprsek. Její hodnota je důležitý parametr, ovlivňující výslednou kvalitu řezu. Při řezání silných plechů má výrazný vliv na odstraňování taveniny z řezné spáry, a především při obrábění tenkých plechů je vyžadovaná její malá hodnota. [59, 61]

Úchylka kolmosti nebo úhlu (u)

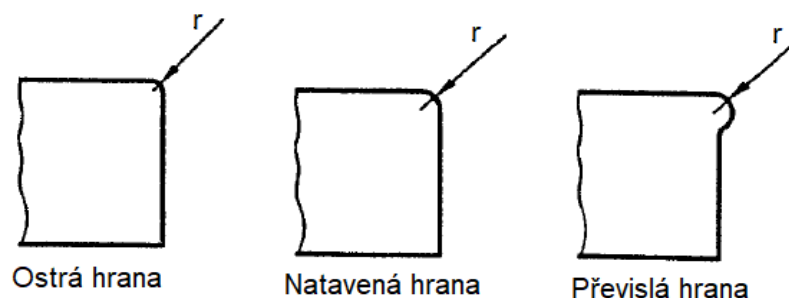
Jedná se o veličinu určující největší kolmou vzdálenost mezi skutečným povrchem řezu a žádoucím profilem. Tato veličina je definována pro svislý i šikmý řez. [59, 61]

Drážkování

Jedná se o drážky nepravidelných rozměrů a tvaru, způsobené vlivem nepravidelného toku taveniny. Vyskytuje se především při nesprávně nastavených řezných podmínkách, zejména rychlosti řezání a vyhodnocují se vizuálně – velikostí a jejich množstvím. [59, 61]

Natavení horní hrany

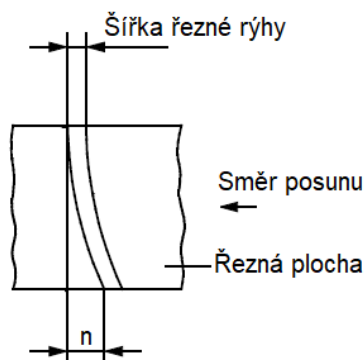
Veličina určující tvar horní řezné hrany, který může být ostrý, natavený nebo převíslý (viz obr. 2.4). [61]



Obrázek 2.4 Natavení horní hrany [61]

Skruz (n)

Tato veličina určuje průmět vzdálenosti počátečního a koncového bodu řezné rýhy ve směru řezání (viz obr 2.5). Obecně se zvětšuje se zvyšující se rychlostí řezání. [61]



Obrázek 2.5 Veličina skruz [61]

Šířka tepelně ovlivněné zóny

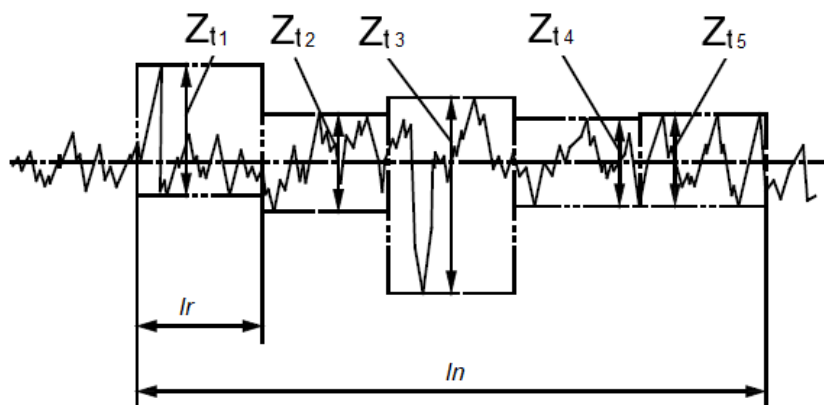
Tato veličina není dle normy zahrnuta mezi standardní úchylky od jakosti řezu, běžně se však v odborných studiích používá jako jedna z veličin pro vyhodnocení kvality řezu. Přirozeně se zvětšuje se zvyšováním energie a tloušťky materiálu. [59]

Drsnost povrchu

Veličiny drsnosti jsou jedním z hlavních kritérií používaných pro hodnocení jakosti řezu a jsou následující:

- Výška prvku profilu Z_t – veličina určující vzdálenost jednoho výstupku a prohlubně profilu drsnosti (viz obr. 2.5),

- **Průměrná výška prvků profilu $Rz5$** – Veličina určující aritmetický průměr výšek prvků profilu na celkové délce, rozdělené na pět jednotlivých základních délek. [61]



Obrázek 2.6 Průměrná výška prvků profilu [61]

Z_t – Velikost jednotlivých prvků profilu,

l_r – Základní délka,

l_n – Celková délka.

2.3.2 Vliv vybraných procesních parametrů na řezný proces

Poloha ohniska a ohnisková vzdálenost

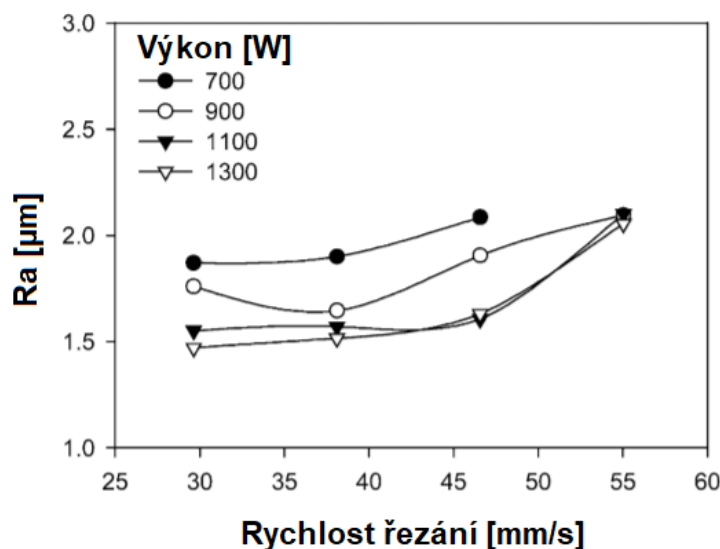
Ohnisko při laserovém řezání představuje bod, ve kterém má laserový paprsek nejmenší průměr. Jeho poloha vůči obrobku je důležitý procesní parametr mající vliv na potřebnou povrchovou hustotu výkonu k proniknutí paprsku materiálem a šířku řezné spáry. Zároveň je k dosažení maximální rychlosti řezání při dobré kvalitě řezu na stroji třeba optimálně volit jeho polohu vzhledem k obrobku, v závislosti na způsobu řezání a tloušťce materiálu. Při oxidačním řezání se běžně volí jeho kladná poloha, tj. umístění nad povrchem obrobku a při tavném řezání poloha negativní. [62, 63]

Ohnisková vzdálenost je určena použitou zaostřovací čočkou a její volba se odvíjí od tloušťky materiálu. Při zvětšující se ohniskové vzdálenosti roste průměr ohniska a tím i hloubka ostrosti. Při řezání silnějších plechů je pak důležité volit větší ohniskovou vzdálenost a tím tedy větší průměr ohniska, který zajišťuje tvorbu širší řezné spáry, která je nutností při řezání silnějších plechů z důvodu umožnění proudění asistenčního plynu o dostatečných objemech, zajišťujícího vyfukování taveniny z řezné spáry. [62]

Rychlost řezání a výkon laseru

Rychlost řezání je jeden z parametrů, který nejvíce ovlivňuje výslednou kvalitu řezu, tzn. především drsnost povrchu, šířku tepelně ovlivněné zóny a vznik otřepů na spodní hraně řezu, a proto je třeba volit její optimální velikost v závislosti na příslušném laserovém výkonu a tlaku asistenčního plynu. Obecně platí, že se zvyšující se tloušťkou materiálu klesá hodnota optimální rychlosti řezání. Při příliš nízkých rychlostech dochází ke tvorbě otřepů a vysokých hodnot drsnosti na spodní hraně řezu. A především může docházet k přílišnému spálení hran řezu, což dále zvětšuje tepelně ovlivněnou zónu. Při příliš vysokých rychlostech také mohou růst hodnoty drsnosti, zvětšuje se počet řezných rýh a skluz a může nastat situace, kdy se plně neoddělí materiál. [59, 64, 65]

Na výkonu závisí maximální možná rychlost řezání. Se zvyšujícím se výkonem roste i šířka řezné spáry na horní i dolní ploše obrobku, přičemž více na horní ploše. Dále hodnoty drsnosti na řezné hraně a při příliš velkém výkonu dochází k větší tvorbě otřepů. Se zmenšováním výkonu dochází k snižování tepelně ovlivněné zóny. Menší odchylky od optimální hodnoty výkonu výrazně neovlivňují výsledek řezu. Na obrázku 2.7 je závislost hodnot drsnosti na rychlosti řezání, vyhodnocené pro několik výkonů řezáním nízkolegované oceli tloušťky 1,27 mm za použití CO₂ laseru [65]. [56, 59]



Obrázek 2.7 Závislost drsnosti na rychlosti řezání [65]

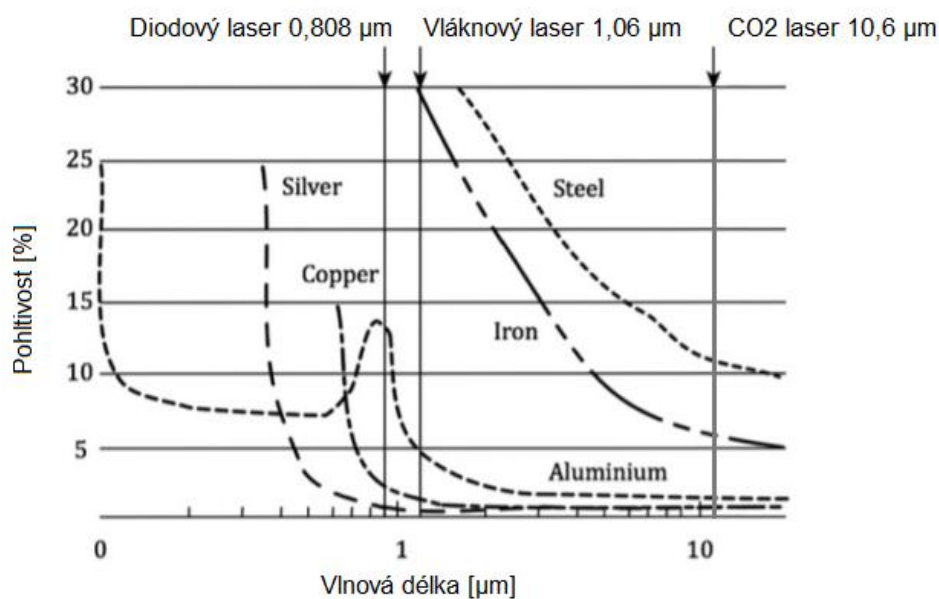
2.4 Vliv laserového zdroje na účinnost řezného procesu při obrábění kovů

Jak už bylo shrnuto v kapitole 1.5, v dnešní době se pro technologii řezání kovů nejvíce využívají principiálně odlišné plynové CO₂ a pevnolátkové vláknové lasery, vykazující odlišné výsledky řezání. Pro firmy, chystající se zainvestovat do nového CNC řezacího centra je proto v závislosti na zpracovávaných kovech a jejich tloušťkách výhodné, kromě jiných důležitých faktorů, při koupi zohlednit i konkrétní

typ laserového zdroje, jelikož se na trhu v současnosti hojně nacházejí oba zmíněné typy.

CO₂ lasery jsou již v průmyslu dlouhou dobu zavedené z důvodu možnosti vysokých výkonů a dobré kvality paprsku. Výhody značně novějších vláknových laserů pak spočívají ve větší účinnosti, spolehlivosti a kompaktnosti z důvodu absence optiky k vedení paprsku do laserové hlavy. U řezání kovů je další výhodou nižší vlnová délka, zajišťující lepší pohltivost materiálu.

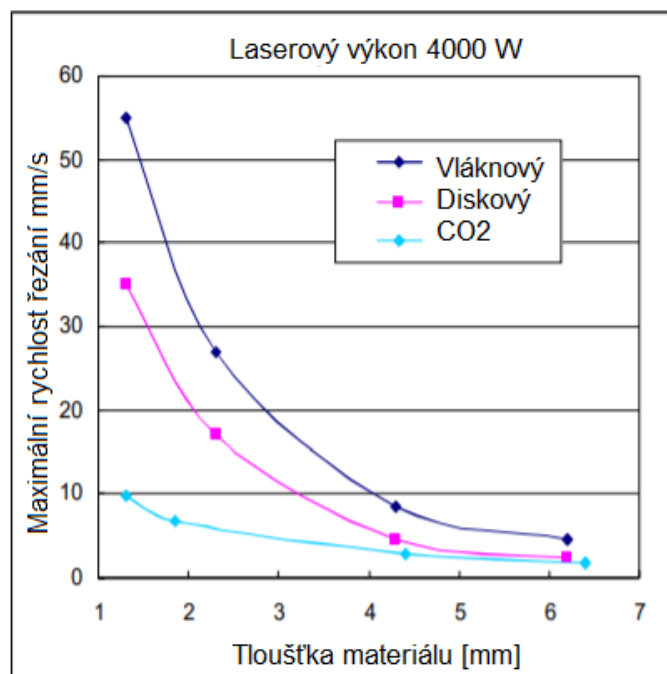
Z experimentálních studií vyplývá, že pro tavné řezání nesilných plechů, typicky do 4 mm tloušťky s inertními asistenčními plyny jako dusík a argon, dosahují vláknové a obecně pevnolátkové lasery, jako i diskový, vyšších rychlostí řezání a lepší výsledné kvality řezu z důvodu lepší kvality paprsku a téměř desetkrát menší vlnové délky. Tyto faktory umožňují fokusaci paprsku do menšího bodu, čímž se dosahuje větší hustoty výkonu. Vlnová délka zde tvoří důležitou veličinu mající zásadní vliv na schopnost materiálu pohlcovat dané záření a měnit ho na tepelnou energii, a tedy na účinnost procesu. Závislost pohltivosti na vlnové délce je zobrazena na obrázku č. 2.10. Pohltivost železa a oceli je pro CO₂ laser přijatelná, u vláknových laserů je však při jejich vlnové délce značně výhodnější. [25, 49, 66, 67]



Obrázek 2.8 Závislost pohltivosti na vlnové délce pro různé materiály [68]

Se zvyšující se tloušťkou materiálu však kvalita řezu vláknovým laserem v porovnání poklesne. K tomu ve většině případů dochází po překročení tloušťky 4 mm. Maximální rychlost řezání zároveň s narůstající tloušťkou začne být srovnatelná až horší než při řezání CO₂ laserem, jak zobrazuje graf 4.5. Při oxidačním obrábění běžných ocelí, které je spolu s tavným řezáním korozivzdorných ocelí nejčastější laserové zpracovávání kovů, dosahují oba typy porovnatelných výsledků. Důvody těchto skutečností nejsou v současnosti plně objasněny, jsou

tudíž stále předmětem dalších studií. Závisí především na úběru materiálu z řezné spáry a přední geometrii řezu, tvořené posuvem laserového paprsku. [49, 66, 67]



Obr. 2.11 Závislost maximální rychlosti řezání na tloušťce materiálu pro různé laserové zdroje [66]

3 MATERIÁLY VHODNÉ PRO LASEROVÉ OBRÁBĚNÍ

3.1 Nelegované a nízkolegované oceli

Rozsáhlé rozšíření technologie laserového řezání vyplívá především z možnosti efektivně řezat všechny nejpoužívanější druhy ocelí. Pro vyráběné oceli s předepsaným minimálním nebo maximálním procentuálním složením prvků menší rozdíly jejich složení výrazně neovlivňují řezný proces. [60]

Jejich nejzásadnějším dělením je z hlediska stupně legování a je následující:

- Nelegované, jenž mají vždy předepsaný maximální obsah fosforu a síry, které jsou běžně do 0,035 % a obsah uhlíku kolem 0,2 %. Z hlediska procentuálního obsahu manganu lze dělit na oceli:
 - do 1,2 % Mn,
 - od 1,6 % do 1,8 % Mn.
- Nízkolegované, jenž lze dělit dle legujících prvků na legované:
 - Cr + Mo, u těchto ocelí je obsah chromu přibližně od 0,8 % do 2,5 % a obsah molybdenu od 0,15 % do 1,2 %.
 - Cr + Mo + V.

Pro nelegované a nízkolegované oceli se jako asistenčního plynu používá reaktivního plynu kyslíku, pro případ požadavku na vyšší kvalitu řezu či absenci okují z důvodu následného lakování součástí lze využít inertního plynu, nejčastěji dusíku. Nízkolegované oceli vykazují podobné řezné vlastnosti, menší procenta nečistot jako síry a fosforu vedou k mírně lepší kvalitě řezu. [59, 60]

Z hlediska chemického složení je nutné, aby procento uhlíku v oceli nepřesáhlo určitou hodnotu, konstrukční oceli s obsahem C nad 0,40 % jsou již náchylné k mikro trhlinám na řezné hraně a lze je obrábět nižšími rychlostmi řezání než v případě ocelí s jeho nízkým obsahem. Zároveň u nich lze dosáhnout menšího maximálního prořezu. Dalším prvkem, který má vliv na řezný proces je křemík, u kterého je žádoucí jeho malý procentuální obsah, v opačném případě dochází k silné tvorbě otřepů v důsledku jeho silné vazby na kyslík. To je především znatelné u ocelí nad 0,4 % Si, u kterých se zároveň dosahuje o více než 20 % nižší rychlosti řezání oproti ocelím do 0,25 % obsahu tohoto prvku. Vysoký a obsah síry a fosforu taktéž přispívá ke zhoršení kvality řezu, tyto prvky mají však i u nelegovaných ocelí vždy předepsaný jejich maximální povolený obsah. [59, 60]

3.2 Vysokolegované oceli

Nejpoužívanějším materiálem z této kategorie je **korozivzdorná ocel**, jenž v průmyslu tvoří velmi důležitý materiál, který je v přímém porovnání s běžnými nelegovanými oceli drahý, ovšem se zohledněním vlastností pro daný účel, ekonomicky velmi výhodný. Vyznačují se vysokým obsahem legujícího prvku

chromu, jehož procentuální obsah musí být vyšší než 11,5 %, kvůli podmínce pasivace (vytvoření ochranné vrstvy na povrchu kovu, sloužící k ochraně proti elektrochemické korozi). Druhým základním legujícím prvkem je Nikl, jehož obsah je běžně kolem 10 %. Obsahují nízké procento C, obvykle pod 0,08 %. Nejpoužívanější konstrukční korozivzdorná ocel je austenitická, kterou lze nalézt v mnoha průmyslových odvětvích, včetně potravinářského. V závislosti na převládající mikro struktuře se dělí na martenzitické, feritické a austenitické.

Pro tyto oceli se v drtivé většině případů využívá inertního plynu dusíku, zajišťujícího velmi dobrou kvalitu řezu, ovšem za značně zvýšenou cenu také z důvodu nutnosti vysokých tlaků plynu. V reakci se vzduchem se na povrchu tvoří tenká vrstva oxidů, skládající se z oxidu chromitého, který při použití kyslíku jako asistenčního plynu omezuje exotermickou reakci, tudíž se tak snižuje účinnost řezného procesu a zároveň má za následek vznik okují a zhoršenou drsnost řezu. Výhodná vlastnost pro laserové řezání těchto ocelí je nízká tepelná vodivost. Při laserovém obrábění je žádoucí, aby její hodnota byla co nejmenší, v opačných případech se velká část termální energie přenáší dále od řezu, což snižuje účinnost procesu. U těchto ocelí se dosahuje poměrně vysokých rychlostí řezání, potřebná energie k jejich dosažení je ovšem značně vyšší. V porovnání s obráběním běžné oceli je pro stejný laserový výkon při dosažení stejné kvality řezu maximální možný průřez dvakrát menší. [59, 60]

3.2 Slitiny hliníku

Hliníkové slitiny jsou ve strojírenství velmi důležitým materiálem a také běžně řezaným laserovým paprskem. Díky nízké hustotě hliníku, jejich poměru mezi měrnou hmotností a pevností, výborné tepelné vodivosti a dobré odolnosti vůči korozi jsou často používaným materiálem v automobilovém průmyslu. Kvůli špatným mechanickým vlastnostem čistého hliníku se však v průmyslu používají jen jeho slitiny, jejichž vlastnosti se dále často zlepšují vytvrzováním. Dle převládajících přísadových prvků se dělí na slitiny:

- Al – Si – Siluminy,
- Al – Cu – Duraluminy,
- Al – Mg – Hydronaliumy.

Pro laserové řezání jsou tyto materiály vhodné méně než oceli. Je to zapříčiněné jeho vysokou tepelnou vodivostí, která jak bylo uvedeno výše, snižuje efektivitu řezného procesu, a tedy umožňuje nižší rychlosti řezání než pro oceli a také zvyšuje potřebnou výkonovou hustotu k vytvoření počátečního zápichu. Na toto má zásadní vliv i nízká pohltivost laserového záření hliníkem, dosahujících nejmenších hodnot u plynových CO₂ laserů. Další komplikací je tvorba povrchové vrstvy oxidů složených z oxidu hlinitého s vysokou teplotou tání, působící stejné problémy jako u korozivzdorných ocelí, proto použití kyslíku není výhodné, častější je použití stlačeného vzduchu. K dosažení nejlepší kvality řezu je nejvýhodnější použití dusíku. [59, 60]

3.3 Slitiny Mědi

Měď se vyznačuje svoji velikou tepelnou a elektrickou vodivostí, v čisté formě se především kvůli svým špatným mechanickým vlastem využívá jen pro elektrotechnické účely, její slitiny však tvoří důležitý strojírenský materiál a dle hlavního přísadového prvku se dělí na Bronzy a Mosazi. Použití bronzů je především na odlitky a následné mechanické obrábění pro strojní součásti jako ložiska a ozubená kola. Většina mosazí a čisté mědi se však používá ke tváření ve formě nejběžnějších polotovarů jako plechů a trubek, laserem nejčastěji zpracovávaným polotovarům.

Jejich vysoká odrazivost, nízká pohltivost infračerveného laserového záření a vysoké hodnoty tepelné vodivosti tyto kovy opět činí hůře obrobitelnými pro laserové řezání. Narozdíl od hliníkových slitin je pro měď nejuvhodnější použití kyslíku jako asistenčního plynu, a to z důvodu tvorby vrstvy oxidů, které zvyšují pohltivost dopadajícího záření. Přírůstek termální energie vlivem oxidační reakce není značný, následkem jsou ale stále vyšší dosahované rychlosti řezání při použití kyslíku než jiných plynů. Větší součinitel tepelné vodivosti mědi $386 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ve srovnání s hodnotou hliníku $237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ je jeden z hlavních důvodů její horší obrobitelnosti. Mosaz s hodnotou $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a nižší odrazivostí, než čistá měď je obrobitelná lépe. Při použití vláknového laseru s běžným výkonem lze měděné a mosazné materiály řezat do tloušťky 6 mm, při použití CO_2 laseru lze řezat pouze velmi tenké měděné plechy při nízkých rychlostech, z důvodu nízké pohltivosti jejich vlnové délky. [59, 60, 69, 70]

3.4 Titanové slitiny

Slitiny titanu jsou drahým materiálem, který je používán ve velké míře v letectví – především pro trupy letadel a výrobu jejich proudových motorů, dále v energetickém průmyslu, kde je převážně využíván pro výrobu lopatek pro parní turbíny či v kosmickém průmyslu. Je tomu tak z důvodu jeho pevnosti srovnatelné s vysokopevnostními oceli, kterou si zachovává i za zvýšených teplot, poměru pevnosti k měrné hmotnosti a dobré odolnosti vůči korozi. Mají velmi obtížnou obrobitelnost třískovým obráběním, proto se v určitých případech jako možnost nabízí použití laserového paprsku, kde hraje roli především pohltivost a tepelné vlastnosti materiálu. [71]

Z důvodu vysoké afinity titanu ke kyslíku, jeho veliké reaktivity při oxidačním řezání a při řezání s dusíkem v prostředí s vysokými teplotami, není vhodné používat tyto běžné plyny. Pro kvalitní řezy s minimálním vznikem vad se používá interního plynu argonu s velmi vysokou čistotou. Při použití kyslíku vzniká nekontrolované hoření a vznik tvrdé povrchové vrstvy oxidů, náchylné ke vzniku trhlin, k čemuž dochází i při řezání dusíkem, kdy se vytváří tvrdá a křehká vrstva nitridů. [59, 60]

4 VYUŽITÍ V PRAXI

4.1 Názorné příklady využití laserových strojů ve firmách

V této kapitole je podrobně pojednáno o dvou společnostech, ve kterých laserové řezání tvoří stěžejní část jejich výroby. Tyto firmy budou tvořit reprezentativní příklady využití laserových strojů v praxi. První společnost vyrábí především vlastní výrobky – svařované a montované sestavy za pomoci vláknového laseru a druhá se zabývá zakázkovou kovovýrobou plechových a konstrukčních dílů za pomoci plynových laserů, kde je v dnešní době již velmi časté nasazení laserových strojů, zajišťujících zvýšenou produktivitu výroby.

4.1.1 FARMTEC a.s.

Společnost FARMTEC a.s. se zabývá poskytováním komplexních služeb v oblasti zemědělství, mezi které patří výroba produktů pro moderní chov hospodářských zvířat, od základních potřeb jako koryta či ohrady, po dodávání ventilačních systémů pro optimální řízení stájového klimatu či zařízení umožňující automatizaci a řízení produkce. Kromě toho společnost poskytuje celkové služby pro technologie využívané v zemědělství včetně návrhu, projektování, provedení samotné stavby a zajištění investic. Příkladem může být výstavba bioplynové stanice a různé možnosti využití jejich zbytkového tepla. [72]



Obrázek 4.1 Ukázka návrhu bioplynové stanice [72]

Společnost se sídlem v Jistebnici-Tisové byla založena v roce 1996 a zpočátku se věnovala například výrobě a opravám zemědělských strojů a projektovým činnostem ve výstavbě. O rok později došlo k vybudování vlastního zázemí pro výrobu a skladování. Následující rok byla založena dceřiná společnost Farmtec SLOVAKIA s.r.o. a Farmtec – VÝCHOD v Bělorusku. Zanedlouho také začíná rozvíjet svoji činnost v zemích Společenství nezávislých států, zejména pokračuje v Bělorusku a nově se snaží o získání trhů v Ruské Federaci a na Ukrajině. O pár let později zakládá FARMTEC – selchoztech v Rusku. V roce 2004 spouští program OP RVMZ, spočívající v napomáhání zemědělcům k získání dotací na investice do zemědělské prvovýroby z fondů EU. Získala také významné

ocenění, a to zařazení mezi 100 nejlepších českých firem za rok 2009 v kategorii zemědělství a potravinářství. [72]

Toto je jen doložení některých z příkladů svědčících o úspěšnosti společnosti a jejím růstu, která dodává produkty nejen v česku, ale i v zahraničí, především v sousedních státech, kromě již zmíněných v současnosti také v Německu či Rusku. V dnešní době zaměstnává celkem 228 osob v celé České republice, přičemž 37 ve výrobním úseku v samotné centrále společnosti. Technologii výroby mají na starosti 4 zaměstnanci. Jelikož firma dodává vlastní výrobky, její výrobní podnik se také skládá ze střediska vývoje, kde nové produkty navrhuje a upravuje 10 konstruktérů.

Zohledněné faktory před koupí konkrétního laserového stroje

Vzhledem k úspěšnému rozvoji firmy a dodávaným produktům bylo logickým a nepřekvapivým krokem, že se v roce 2010 rozhodla investovat do CNC laserového stroje, osazeném vláknovým laserem, díky čemuž si začala sama produktivně vyrábět díly jednotlivých výrobků. Došlo tedy k rozšíření strojového parku o jeden laserový stroj.

Jako důležitý faktor, vedoucí k pořízení vláknového laseru lze označit zpracovávané materiály, které tvoří výhradně kovy, nejčastěji běžnou konstrukční a korozivzdornou ocel. Tyto materiály mají velkou pohltivost záření o vlnové délce 1070 nm, díky čemuž se dosahuje efektivního procesu řezání. Dřevo, plasty či kompozitní materiály, na které by bylo nutné použít CO₂ laser, se ve firmě nezpracovávají.

Jako další kritérium lze označit tloušťku řezaných polotovarů – tabulí plechu, která je nejčastěji do tloušťky 5 mm. Jak je uvedeno v kapitole 2.9, pro plechy do tloušťky 4 mm je značně výhodnější použít vláknový laser z důvodu dosahování vyšších rychlostí řezání a lepší výsledné kvality tavného řezání, viz obr 4.2, foto řezu korozivzdornou ocelí tloušťky 3 mm. Jedna z nejzásadnějších nevýhod laserového obrábění – ztráta kvality řezu při velmi velkých tloušťkách a omezený maximální prořez, jenž je běžně 25 mm, zde nehrála roli.

Jako třetí a nejzásadnější faktor vedoucí k pořízení laserového stroje obecně lze uvést potřebu zvýšit produktivitu výroby, dále dosažení vyhovující jakosti řezné plochy a rozměrovou přesnost konkrétního stroje $\pm 0,1$ mm pro účel výpalků, dále zpracovávaných často ohýbáním a svařováním, vedoucím ke konečným produktům pro chov hospodářských zvířat.



Obrázek 4.2 Detail řezu korozivzdornou ocelí tloušťky 3 mm vláknovým laserem

Charakteristika a využití stroje ve výrobním procesu

Zařízení nese označení Nessap Gama a pracuje s maximálním řezacím výkonem 3 kW, příkonem od 9 do 10 kW a emituje záření o vlnové délce 1064 nm. Vyrobeno a dodáno bylo v roce 2010 od českého výrobce Řízené stroje s.r.o. Jedná se o stroj s portálovou konstrukcí o pracovním rozsahu 1520 x 3050 mm, který disponuje výměnnými stoly, dnes běžným systémem dodávaným k laserovým strojům, zajišťujícím vyjímání vyřiznutých součástí, zatímco stroj řeže aktuální tabuli plechu. Výrobce uvádí, že je určen pro řezání konstrukčních ocelí od 0,5 do 18 mm a legovaných ocelí od 0,5 do 10 mm tloušťky s možností řezat slitiny mědi, mosazi a slitiny hliníku. Stroj nebyl dodán s vlastním automatickým podávacím zařízením. Další informace o stroji jsou uvedeny v kapitole 3.9 [48]



Obrázek 4.3 Laserový stroj Nessap Gama

Řezání na tomto zařízení tvoří ve většině případů první krok ve výrobním procesu, kdy se z tabulí plechu vyřezávají ploché části dílů a dále se, v závislosti na konkrétní součásti, navazuje na další stroje. Polotovary jsou dodávány s rozměry 1000 x 2000, 1250 x 2500 a 1500 x 3000 mm, přičemž z jedné tabule se při maximálním využití plechu vypálí většinou do 200 kusů.

Výrobní hala, kde se stroj nachází, disponuje všemi potřebnými stroji ke zpracování plechů a tyčových polotovárů. K dělení šest pásových pil na tyčový materiál do průměru 300 mm, tabulové nůžky na stříhání plechů, profilové nůžky na dělení tyčového, profilového materiálu a prostřihování otvorů či excentrické lisy. Ke tváření ohraňovací lis k ohýbání plechových dílů do 3000 mm délky, ohýbačku trubek a tyčových materiálů, hydraulický lis a excentrický lis s množstvím jednoúčelových nástrojů. Dále řadu obráběcích strojů a možnosti svařování běžných i nerezových ocelí. [72]

Laserový stroj pracuje nepřetržitě v jedné nebo ve dvou směnách v závislosti na provozu výrobní dílny. Manipulace s polotovarů probíhá za pomoci jeřábu ruční manipulací operátorem. Za dobu svého uvedení do provozu se laser společnosti již mnohokrát zaplatil, ovšem vzhledem k neustálému vývoji a modernizaci CNC laserových stanic a opotřebování složitých částí při provozu je zřejmé, že je v dnešní době již problematické shánět náhradní díly. Společnost tedy brzy plánuje zainvestovat do novějšího stroje stejného typu. Materiál se skladuje venku v přístřešku vedle výrobní haly v regálech (obr. 4.4) a pomocí vysokozdvizného vozíku je dopravován do dílny.



Obrázek 4.4 Skladování polotovárů

4.1.2 DITA výrobní družstvo invalidů

Společnost se sídlem v Táboře a působením na trhu již od roku 1956 poskytuje služby v oblasti kovovýroby, výroby textilu, plastových výrobků pro označování hospodářských zvířat a specializované montáže. Kromě dodávání různorodých výrobků a služeb za pomoci moderních technologií, společnost vyniká tím, že již od samotného založení zaměstnává velký počet osob se zdravotním znevýhodněním, v současnosti více než 50 % z celkového počtu 230 zaměstnanců. Také získala, z vyhlášení nejlepších firem Jihočeského kraje, titul Odpovědná firma kraje 2016 a v kategorii Firma roku 2016 obdržela druhé místo. [73]

Zpočátku s cílem zaměstnávat především osoby zdravotně znevýhodněné se družstvo zaměřovalo na výrobu např. drobné galanterie a bižuterie, dále také na technické služby, mezi jež patřily opravy motorek, aut a jízdních kol. Postupem času svoji činnost rozvíjela a začala nabízet větší počet různorodých služeb, příkladem mohou být nožířské práce a opravy hudebních nástrojů a ladění pian. V roce 1966 již nabízela textilní výrobu, kovovýrobu, výrobu pro zdravotnictví a popis známek pro hospodářská zvířata. V této době ještě výroba probíhala na více místech v Táboře. V roce 1980 až 1985 byl však postaven nový závod a veškerá výroba, kromě provozovny kovovýroby, se soustředila tam. Kovovýroba, tvořící nedílnou část družstva, je umístěná v obci Stádlec a v současnosti je plně vytížena zakázkovou výrobou. [73]

V provozovně kovovýroby, která zaměstnává přibližně 30 zaměstnanců, se v současnosti plně soustředí na zakázkovou výrobu, týkající se velmi širokého spektra výrobků z plechů, o velkém rozptýlu tloušťek, pro různé zákazníky. Příkladem mohou být ocelové police, regály, rozvaděčové skříně či výrobky pro nábytek jako panty a rámy. Společnost poskytuje především výrobu polotovarů, určených k dalšímu zpracování, kde má stěžejní postavení řezání laserem a ohýbaní na CNC ohraňovacích lisech. Výroba téměř vždy začíná na laserovém stroji a následně polotovar buďto putuje k zákazníkovi, anebo, a to ve většině případech, výroba navazuje na ohraňovací lis. Jelikož provozovna disponuje i zámečnickou dílnou a práškovou lakovnou, dodávají i dále zpracovávané polotovary, a to například svařováním a vrtáním.



Obrázek 3.8 Stroj TruLaser 3030 (L20)

Výrobu formou kooperace pro vícero stálých zákazníků a většího počtu menších zakázek v současnosti obstarávají dvě CNC laserová řezací centra. Jedno s označením TruLaser 3030 (L20) od společnosti TRUMPF s výkonem 4 kW (obr. 3.8), který si firma pořídila v roce 2013. Tento stroj je osazen CO₂ laserovým zdrojem s označením TruFlow a je určený pro řezání tenkých i silných materiálů. Emituje záření o vlnové délce 10600 ns a pracovním rozsah má 3000 x 1500 mm. Výrobce uvádí, že maximální řezané tloušťky jsou 20 mm pro konstrukční ocel, 15 mm pro ušlechtilou ocel a 10 mm pro slitiny hliníku. Stroj pracuje s průměrným příkonem 31 kW. Jako přídatně dodávaný manipulační prvek se společnost rozhodla pořídit zařízení LoadMaster, umožňující automatické nakládání před stroj připravených polotovarů na pracovní stůl laseru (obr. 3.9). Dalšími možnostmi bylo zařízení s plně automatizovaným nakládáním a vykládáním, nebo zařízení pokrývající i další funkce jako třídění hotových dílů a zbytkových mříží, ale vzhledem k objemu výroby divize, by tyto možnosti nebyly rentabilní. [74]



Obrázek 3.9 Nakládací zařízení LoadMaster

Druhý stroj nese označení LVD AXEL 3015-S, pracuje s výkonem 2,5 kW a je opět osazen CO₂ laserem. Tento stroj je společností využíván od roku 2006. Vyzařuje stejnou vlnovou délku a má stejný pracovní rozsah 3000 x 1500 mm s možností řezat nelegované a nízkolegované oceli do tloušťky 15 mm, korozivzdorné a další legované oceli do tloušťky 8 mm a slitiny hliníku do 6 mm. Manipulace s polotovary probíhá ručně za pomoci jeřábu s vakuovými přísavkami.

Jak již bylo zmíněno, spolu s lasery základ výroby tvoří i CNC ohraňovací lisy, které společnost vlastní dva. Jsou jimi moderní stroje od společnosti TRUMPF, s označením TruBend 5085 a 5230 s maximální ohraňovací délkou 2210 a 3230 mm.

Řezané polotovary jsou tabule plechu o formátech 2000 x 1000, 2500 x 1250 a 3000 x 1500 mm. Většinu zpracovávaných materiálů tvoří nelegované oceli, válcované za studena, konkrétně S235, S355 a DC01 dle EN normy. Tloušťky těchto materiálů se pohybují od 0,5 do 15 mm. O něco méně častým materiálem je korozivzdorná ocel, ze kterých firma nejvíce zpracovává ocel jakosti AISI 304, jenž

je válcovaná za tepla a zpracovávána do tloušťky 8 mm. Na rozdíl od předchozí společnosti se zde v menší míře vyrábí i ze slitin hliníku, konkrétně z jednoho typu s označením EN AW-5754 a chemickou značkou AlMg3 a taktéž s tloušťkami do 8 mm. Menšinu polotovarů tvoří také pozinkované plechy s tloušťkami od 0,8 do 3 mm a v nejmenší míře pak otěruvzdorné oceli Hardox.

5 NÁVRH VÝROBNÍHO PROCESU

V této experimentální části bude sestaven výrobní proces a vyrobena navržená součást laserovým obráběním, což mohlo být uskutečněno díky firmě **FARMTEC a.s.**

Pro tento účel bude vytvořen fiktivní model firmy, a to typického představitele strojírenského podniku vlastního laserový stroj. Bude jím menší strojírenská firma s plným zaměřením na kusovou výrobu. Střední a menší firmy si jej často pořizují ke zefektivnění své výroby a řada z nich se z velké části zabývá právě zakázkovou kovovýrobou, kde mají laserové stroje pro tyto případy nezastupitelnou roli.

Její největším výrobním zaměřením bude kromě zpracovávání plechů laserovým řezáním také CNC ohýbáním na ohraňovacích lisech, které je velmi důležitou universální technologií, jenž v praxi velmi často spolu s laserovým řezáním tvoří stěžejní část výroby a zároveň první krok při zpracování plechových polotovary. Firma bude mít velmi široké spektrum produktů, na kterých se výrobně podílí a poskytovat bude produkty, určené k následnému zpracování zákazníkem. Firmy, objedávající si výrobu, budou dodávat výrobky z plechů, například pro elektrotechnický průmysl – různé kryty či rozvaděčové skříně, dále pro vybavení interiérů – skladů, dílen či obchodů, jako kovové skříně nebo dílenské stoly. Dále jimi budou často zákazníci, vyrábějící svařované a montované sestavy jako branky, brány, vrata atd.

Pro dostatečné pokrytí objemu výroby by se předpokládalo využívání dvou laserových strojů, které by pracovali nepřetržitě nebo ve dvou směnách. Jeden vláknový, v této firmě určený pro produktivní zpracovávání kovových plechů do 5 mm tloušťky a druhý CO₂ laserový stroj pro efektivní obrábění materiálů nad 5 mm.

5.1 Používané polotovary

Vzhledem ke zpracovávaným výrobkům by v této firmě většinu materiálů tvořily běžné konstrukční oceli – nelegované jakostí oceli a oceli obvyklých jakostí a druhým nejpoužívanějším materiálem dále vysokolegované korozivzdorné oceli. V menší míře a tloušťkách také pozinkované plechy.

Prvním materiálem jsou konstrukční oceli válcované za studena. Ty jsou nejběžněji dodávány v jakostech DC01 až DC05 dle normy EN 10130 do tloušťky 4 mm. Jednotlivé oceli se liší především svojí tažností. Značně nejpoužívanější z této skupiny je ocel DC01, vhodná pro všechny běžné operace plošného tváření a její vlastnosti jsou v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 Vlastnosti oceli DC01 [75]

Označení oceli a její vybrané mechanické vlastnosti					
Norma EN	Numerické označení	Označení dle EN	Dolní mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Min. tažnost [%]
10130	1.0330	DC01	280	270-410	28
Předepsaný maximální povolený obsah prvků v hmotnostních [%]					
C	Mn	P	S	N	Cu
0,12	0,6	0,045	0,045	-	-

Dalším typem materiálu je konstrukční ocel tvářená za tepla, ty by se vzhledem k výrobkům a maximálnímu prořezu laserovými stroji dodávaly do tloušťky 20 mm. Tyto oceli se dodavateli rozlišují značkou dle EN normy začínající písmenem S, následovaným hodnotou minimální meze kluzu a vždy končícím dvojnakovým označením pro hodnotu vrubové houževnatosti oceli. V případě dodatečné technologické specifikace následuje doplňkové písmeno, např. N, které značí normalizační žhání. Patří k nejčastějším materiálům ve výrobním průmyslu, často určené pro svařované konstrukce. Nejběžněji dodávané jsou například S235JR + N, S235JRC a S355J2. V tabulce 5.2 jsou vlastnosti jejich typického představitele. [76]

Tabulka 5.2 Vlastnosti oceli S235JR + N [77]

Označení oceli a její vybrané mechanické vlastnosti do tloušťky 16 mm				
Norma EN	Numerické označení	Označení dle EN	Dolní mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
10025-2	1.0038	S235JR	235	360-510
Předepsaný maximální povolený obsah prvků v hmotnostních [%]				
C	Mn	P	S	N
0,17	1,40	0,035	0,035	0,12

Další již méně zpracovávanou kategorií budou korozivzdorné oceli, dodávané do tloušťky 10 mm, které jsou v praxi nejčastěji využívané válcované za tepla a povrchově upravené moření. Nejčastější je ocel 1.4301, často dodavateli označovaná dle Amerického institutu pro železo a ocel AISI 304. Její vlastnosti jsou v tabulce 5.3.

Tabulka 5.3 Vlastnosti oceli AISI 304 [78]

Označení oceli a její vybrané mechanické vlastnosti do tloušťky 8 mm							
Norma EN	Numerické označení	Označení dle AISI	Smluvní mez kluzu (0,2 %) [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Min. tažnost [%]		
10088-2	1.4301	304	230	540-750	45		
Předepsaný maximální povolený obsah prvků v hmotnostních [%]							
C	Mn	P	S	N	Cr	Ni	Si
0,07	2,00	0,045	0,015	0,11	17,5 - 19,5	8,00 – 10,5	0,015

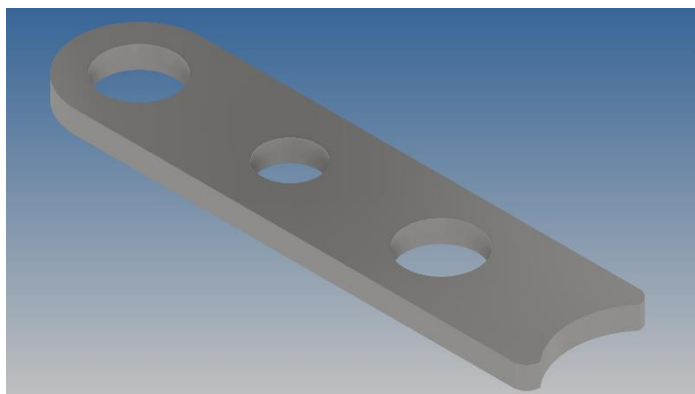
Jako poslední typ používaného materiálu budou pozinkované plechy, které se nejčastěji dodávají žárově zinkované. Tato metoda, sloužící k ochraně proti korozi, je velmi častý způsob ošetření povrchu ocelových výrobků. Kromě následného zinkování po zpracování polotovaru se často využívají předem zinkované tabule plechu, běžně dodávané do tloušťky 3 mm.

5.2 Vstupní údaje

Informace od zákazníka

Pro tuto modelovou situaci bude uvažován požadavek zákazníka na výrobu tvarově jednoduché konstrukční součásti, určené ke svařování a čepovému spojení, viz obr. 4.1. Zákazník uvedl, že má být vyrobena z běžné konstrukční oceli, vhodné ke svařování a uvedl, že požaduje výrobu 787 kusů. Model a výkres součásti byl vytvořený v programu Autodesk Inventor 2021 a převedený do souboru formátu DWG. Výkres je Příloha 1.

Pro tento modelový případ tedy požaduje výrobu pouze jedné této součásti, která je částí svařované trubkové konstrukce, jenž si sám vyrábí. Jedná se o zákazníka, jenž má s firmou dlouhodobou spolupráci a výrobně kooperují i na jiných zakázkách. V této fázi tedy dochází k předání důležitých informací o požadavcích výroby. Zákazník si například může určit druh asistenčního plynu u situace, kdy se díly následně lakují a řezání s použitím kyslíku by nebylo vhodné. Dále zhodnocení vhodnosti technologie pro tento účel – zdali je přesnost daného stroje dostačující na účel součásti, či zda velikost otvorů není pro dosažení kvalitního řezu příliš malá atd. Následně dochází k vytvoření cenové kalkulace.



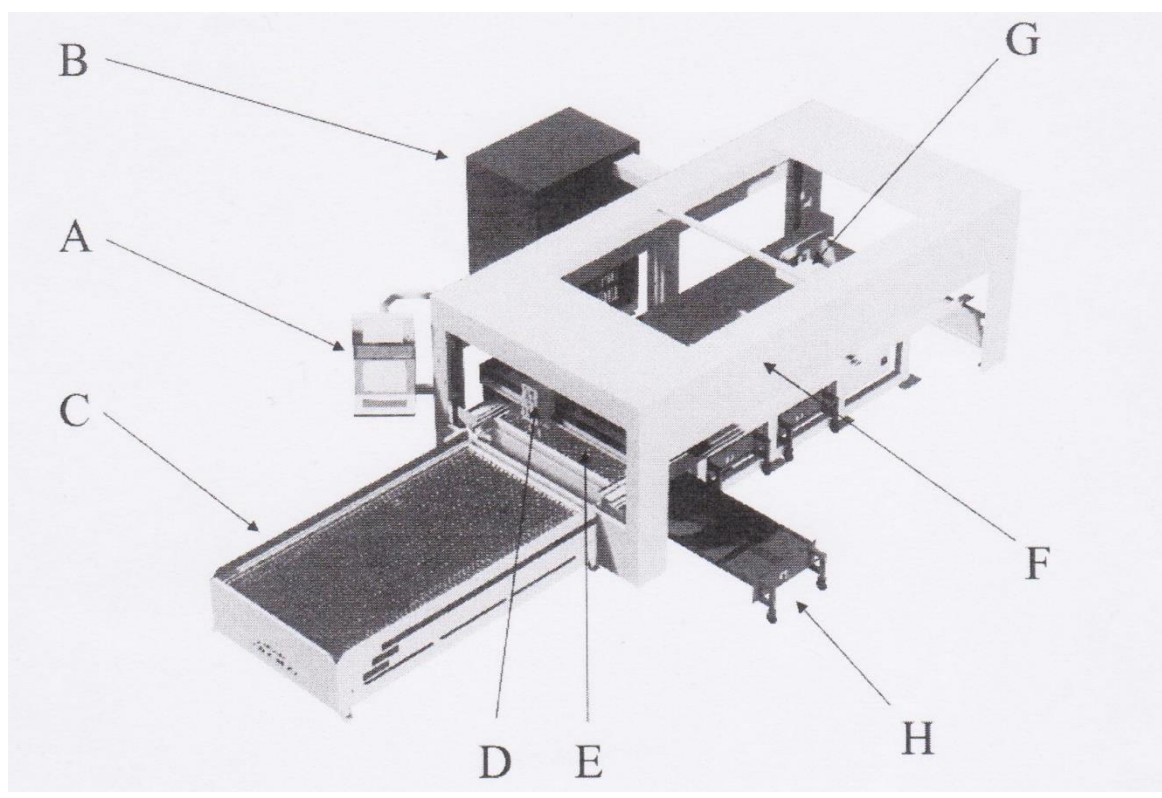
Obrázek 5.1 Model součásti

Zvolený materiál

Jako materiál byla zvolena běžná nelegovaná konstrukční ocel s označením dle EN S235JR+N, jenž je válcovaná za tepla. Tato ocel vyhovuje požadavku zákazníka na její svařitelnost a mechanické vlastnosti. Patří do kategorie materiálů, které jsou vhodné pro svařované konstrukce se statickým i dynamickým namáháním, její označení a důležité vlastnosti jsou vypsány v tab. 5.2.

Volba výrobního zařízení

Jako výrobní zařízení je použit vláknový stroj Nessap Gama, schopný zajistit dostatečnou rychlost řezání a kvalitu řezné hrany.



Obrázek 5.2 Celkový náhled na stroj Nessap Gama [48]

- | | |
|---------------------|-------------------|
| A – řídicí panel, | E – řezný stůl, |
| B – laserová skříň, | F – krycí box, |
| C – výměnný stůl, | G – řídicí skříň, |
| D – řezný portál, | H – popelníky. |

Technické parametry:

Tabulka 5.4 Technické parametry stroje Nessap Gama [48]

Pracovní rozsah	(X: 1520; Y: 3050) mm
Maximální hmotnost plechu	500 kg
Odchylka od pozice	$\pm 0,1$ mm
Maximální výkon laseru	3 kW
Šířka řezné spáry	0,2 – 0,4 mm
Maximální řezná rychlost	10 m/s
Maximální přejezdová rychlost	30 m/s

Další důležité specifikace zařízení [48]:

Vlnová délka – (1070 až 1080) [nm],
 Nominální výstupní výkon – (0,3 až 3) [kW],
 Spotřeba energie – (9 až 10) [kW],
 Maximální modulační frekvence výstupního svazku – 5 [kHz],
 Poziční odchylka – $\pm 0,1$ mm,
 Průměr paprsku – 3 nm.

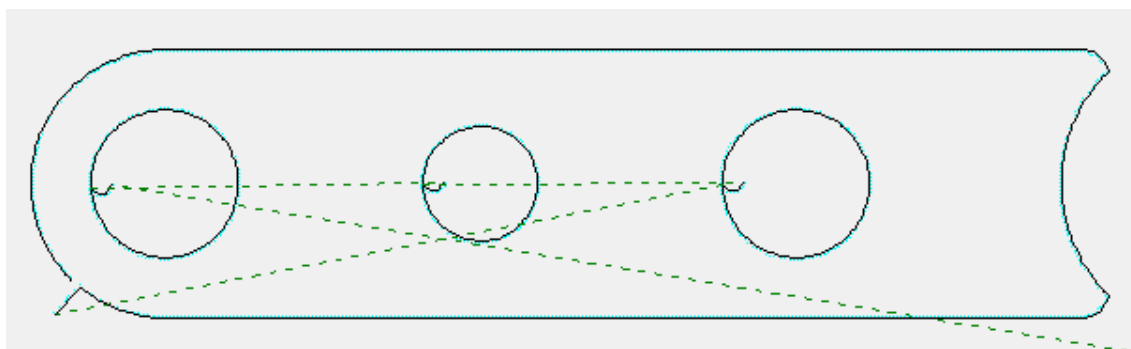
Jednotka napájení technickými plyny poskytuje přívod čistého stlačeného vzduchu, kyslíku nebo dusíku. Stroj byl dodán s technologickým CAD/CAM programem WRYKRYŠ, o kterém je pojednáno v kapitole 4.3. [48]

5.3 Postup výroby navržené součástky

- V programu se pro součást s rozměry 114 x 28 mm zvolil vhodný polotovar – materiál S235JR + N, tloušťka 5 mm, Ideální rozměr polotovaru je 120 x 33 mm vzhledem k potřebné velikosti dráhy nájezdu laserového paprsku při zapichování, k výrobě součásti byl však z ekonomických důvodů použit zbytkový kus plechu.
- Zhotovený a převedený výrobní výkres do formátu DWG se za pomoci programátora naimportoval do programu WRYKRYŠ, kde se kontura součásti vhodně umístila na polotovar a tím započala tvorba NC programu.
- Následně bylo zvoleno místo počátečního zápichu a délka nájezdu na konturu součásti, jenž je přímoú čarou na rádius a jehož délka je 5 mm

viz. obr. 5.3. V tomto případě se k nastavování nájezdu vždy váže volba hodnoty přerušení, což je délka, kterou laserový paprsek při své dráze nedořeže. Důvodem je zamezení vypadnutí malých dílců pod rošt k odpadu a rizika nadzvednutí dílce při řezání a potenciálního nárazu do laserové hlavy. Zvolena byla délka 1 mm. Dále byly nastaveny zápichy a nájezdy na kontury děr.

- V poslední řadě se zvolila hodnota kompenzace, která se v tomto případě pro daný stroj nastavuje z důvodu korekce dráhy laserového paprsku a dosažení výpalků s vyhovující přesností. Při zadávání číselných hodnot se vycházelo z příslušné technologické tabulky zohledňující druh materiálu a jeho tloušťku, dodané od výrobce CNC stroje a upravené na základě zkušeností s tímto strojem.



Obrázek 5.3 Naprogramovaná kontura součásti

Po odeslání NC programu (Příloha 2) na stroj byl operátorem v řídicím systému stroje vyhledán a načten. Následně bylo třeba na laserové hlavě vyměnit průměr trysky na hodnotu 1 mm, jejíž volba se učinila na základě tloušťky materiálu. Dále hodnotu polohy ohniska, která byla z důvodu oxidačního řezání 5 mm tlustého plechu zvolena pozitivní s hodnotou 2,2 mm. Zbylé parametry byly již ve stroji optimálně přednastavené a pouze se tedy zvolily pro daný polotovár.



Obrázek 5.4 Vyrobená součást

Laserový paprsek nejdříve postupně vyřezal obrysy děr, a následně konturu součásti se zmíněným přerušením. Před každým řezáním obrysu byl proveden počáteční zápich. Polotovár byl řezán rychlostí 2500 mm/min s výkonem 2200 W a vzhledem k oxidačnímu způsobu řezání s tlakem asistenčního plynu v řezu 0,9 bar a tlakem 1,6 bar při zapichování. V závislosti na kvalitě výsledného řezu, operátor může upravovat velikost rychlosti řezání, v tomto případě však bylo dosaženo

dostatečně kvalitního řezu, značíci správnost nastavení řezných podmínek. Ovládací panel CNC zařízení vyhodnotil **celkový čas řezu na 28 sekund** s celkovou délkou řezu 421,1 mm.

5.4 Příprava výroby zakázky

Příprava výroby programátorem, který má na starosti stroje pro řezání a značení laserem vždy začíná buďto v CAD programu vytvořením či úpravou poskytnuté 2D kontury, nebo přímo v CAD/CAM softwaru, dodávaném k CNC stroji. Při zakázkové výrobě mezi jeho úkoly patří přijímání souborů od zákazníka, které jsou nejčastěji ve formátech DWG a DXF, mohou však být i například ve formátu GEO, se kterým pracuje program TruTops, který se dodává k velmi často využívaným strojům od firmy Trumpf. Dále kontrola vyrobitelnosti dílců, výběr materiálu a rozměru tabule plechu – ten je v tomto případě dodáván v rozměrech 2000 x 1000, 2500 x 1250 a 3000 x 1500 mm a volba či pouze kontrola příslušných technologických parametrů.

Základní funkcí těchto CAD/CAM programů je tvorba NC programu, dále možnost vytvářet či upravovat jednoduché 2D kontury a tzv. „nesting“, neboli automatické rozmisťování dílů na polotovaru po jeho výběru. Z něho pak lze vytvořit celkové náklady na danou zakázku.

Kromě zmíněných úkonů při přípravě výroby zvolené součásti byl dále vytvořen nářezový plán (příloha č. 3.) Vzhledem k velikosti objemu zakázky 787 kusů byl zvolen polotovar 2500 x 1250 mm. Technologický přídavek, tzn. mezera mezi dílci na nářezovém plánu byl již v programu nastaven na optimální hodnotu 5 mm. Pro tento modelový případ se všechny kusy vmístily na plochu tabule s maximálním možným využitím polotovaru, kterého se dosáhlo umístěním dílů vertikálně vůči delší straně tabule a vyplněním vzniklé mezery několika díly. V reálném případě většinou dochází k tomu, že se kusy, jenž se na polotovar nevmístí, umístí na zbytkové kusy tabulí o daném minimálním rozměru, které také mohou být uloženy v příslušném CAD/CAM softwaru a programátor je následně může pro vhodnou zakázku použít. Tyto kusy musí být vhodně skladovány blízko CNC zařízení.

5.5 Vyhodnocení

5.5.1 Využití materiálu při laserovém řezání

Technologické CAD/CAM programy mají při vytváření nářezového plánu funkci vyhodnocování využití tabule plechu. V tomto případě bylo vyhodnoceno materiálové využití 63,42 %, pro jehož výpočet byly zahrnuty vyříznuté otvory. Pro lepší přehled využití tabule plechu s ohledem na technologický přídavek bylo vypočítáno čisté využití tabule bez zahrnutí otvorů součástí. Pro výpočet obsahu součástí byl použit program Autodesk Inventor 2021.

Výchozí hodnoty:

Plocha tabule $S_t = 3\,125\,000$ [mm²],

Plocha jedné součásti $S_{vyp} = 3043,214$ [mm²],

Celkový počet součástí $n = 787$ [-].

Využití tabule:

$$\eta = \frac{S_{vyp} \cdot n}{S_t} \cdot 100 [\%], \quad (5.1)$$

$$\eta = \frac{3043,214 \cdot 787}{3\,125\,000} \cdot 100 = 76,64 \%$$

Tato výsledná hodnota značí využití tabule plechu a pro celou zakázku, jejichž procenta může technolog ovlivnit i změnou velikosti technologických přídavek. Zde je však třeba při zmenšování mezery mezi dílci brát ohled na rozstřík taveniny při zapichování. Tento aspekt přípravy výroby je velmi důležitý, jelikož firmy vlastníci laserový stroj musí z důvodu udržitelnosti na trhu vykazovat určité objemy výroby – při dvousměnné nebo nepřetržité výrobě dochází k velké spotřebě materiálu a z toho vychází nutnost technologa dbát na hospodárné rozmístování kontur výpalků na nářezovém plánu.

5.5.2 Výrobní čas při laserovém řezání

Při kalkulaci výrobních nákladů jsou výchozím parametrem čas výrobního zařízení a současná cena materiálu, ze kterých se s následným zahrnutím nákladů na provoz stroje (náklady na použitý asistenční plyn, náklady na mzdy, cena energie atd.), vytvoří jejich celková cenová kalkulace.

CAD/CAM programy pro přípravu výroby mají funkci vyhodnocování spotřeby času na základě zadaných vstupních dat pro daný laserový stroj a materiál.

Časové normativy pro stroj Nessap Gama a materiál S235JR + N, tloušťky 5 mm:

- $t_{\bar{r}} = 0,418$ [min],
- $t_p = 0,025$ [min],
- $t_z = 0,083$ [min].

kde:

$t_{\bar{r}}$ je čas řezání na metr [min],

t_p je čas na přejezdy laserové hlavy na metr [min],

t_z je čas na zhotovení 1 zápichu [min].

Spotřeba času 1 součástky

Program vynásobením těchto časů s vyhodnocenou délkou řezu 1 součásti, která činí 0,426 m, dále s délkou přejezdů laserové hlavy 0,255 m a přičtením časů na vytvoření 4 zápichů vyhodnotil jednotlivé časy a výsledný čas řezání:

- $t_{\check{r}j} = 0,179$ [min],
- $t_{pj} = 0,001$ [min],
- $t_{zj} = 0,332$ [min],

Celkem = 0,512 [min].

kde:

$t_{\check{r}j}$ je čas v řezu pro jednu součást,

t_{pj} je čas na přejezd laserové hlavy pro jednu součást,

t_{zj} je čas na zhotovení zápichů pro jednu součást.

Vyhodnocený celkový čas programem WRYKRYYS činí 0,512 minut, tedy 30,72 sekund. Mírně se liší od vyhodnoceného času ovládacím systémem CNC zařízení, který činí 28 sekund. Toto je způsobeno mírně odlišnými reálnými řeznými podmínkami, než je v programu přednastaveno, a možnou nepřesností stroje.

Spotřeba času zakázky

Následně na základě vyhodnocené délky řezu pro celou zakázku 335,02 m, přesunu laserové hlavy – 156,088 m a celkového počtu zápichů 3148, bylo jejich vynásobením se vstupními daty zjištěno:

- $t_{\check{r}c} = 140,038$ [min],
- $t_{pc} = 3,902$ [min],
- $t_{zc} = 261,284$ [min],

Celkem = 405,224 [min].

kde:

$t_{\check{r}c}$ je čas v řezu pro celou zakázku,

t_{pc} je čas na přejezd laserové hlavy pro celou zakázku,

t_{zc} je čas na zhotovení zápichů pro celou zakázku.

Od tohoto výsledného času 405,224 minut by se na základě současné ceny materiálu S235JR + N, který tvoří 1 tabuli plechu 2500 x 1250 mm, jehož cena u dodavatele Feron, a.s. činí při koupi alespoň pěti kusů 5252,05 Kč za kus, a nákladů na provoz stroje určila výsledná cena zakázky. Vzhledem k výsledným

časům na zhotovení zápchů a vyšším tlakům asistenčního plynu, než v řezu je zřejmé, že při kalkulaci celkových nákladů hraje velkou roli i počet otvorů součásti.

ZÁVĚR

Zadaná bakalářská práce se v první části zabývala laserovými stroji. V dnešní době jsou stále velmi rozšířené plynové CO₂ lasery, které jsou již od 60. let hojně využívány pro řezání kovů. Mají však své zásadní nevýhody, pro které se v průmyslu začaly prosazovat lasery pevnolátkové, mezi nejnovější a nejperspektivnější patří v dnešní době laser vláknový. Ty jsou však oproti CO₂ laserům značně vhodnější pro řezání kovových polotovarů do 4 až 5 mm tloušťky a méně vhodné pro tlusté plechy. Strojírenská firma tak při pořizování nového stroje musí zohlednit i konkrétní typ. Dále se zabývala teorií laserového řezání, ze které plyne, že je tato technologie velmi vhodná pro všechny nejdůležitější kovové materiály v průmyslu. Vhodnost materiálu pro tuto technologii závisí především na jeho tepelných vlastnostech a pohltivosti. Je také velmi citlivá na nastavení správných podmínek řezání a na volbě asistenčního plynu, který významně ovlivňuje výslednou kvalitu řezu. Nakonec byl proveden průzkum využití těchto strojů v praxi a uvedeny firmy, které v dnešní době představují typické uplatnění těchto strojů, jenž je k produktivnímu obrábění kovových tabulí plechu. Na tomto základě byl vytvořen fiktivní model firmy, dále navržena a vyrobena součást a vytvořen výrobní proces, jehož výsledkem byla kvalitně vyrobená součást za optimální čas.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VOJTA, Filip. *Princip laseru*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>
- [2] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [3] Laser. In: *czechlasers.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://czechlasers.cz/studovna/laser-2/>
- [4] WOODFORD, Chris. Lasers. In: *explainthatstuff.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/lasers.html>
- [5] JANÍČKOVÁ, Petra. *Nekonvenční technologie obrábění – laser*. [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/laser-projekt-sablona.pdf>
- [6] KUSALA, Jaroslav. Princip laseru. In: *cez.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
- [7] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [8] RAMBOUSEK, Zdeněk. *Laserové stanice: zdroje, technologie, konstrukce*. Liberec: VÚTS, a.s., 2015, 90 s. ISBN 978-80-87184-61-5.
- [9] [3D Fiber Laser Cutting Machine]. In: *pentalaser.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://pentalaser.com/en/view/110.html>
- [10] Procesní hlava ProCutter. In: *raptor-cnc.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.raptor-cnc.com/cnc-laser.html#inline-gallery-6>
- [11] Rozdělení laserů. *LASCAM* [online]. 2.8.2015 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [12] Gas lasers. *rp-photonics.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/gas_lasers.html
- [13] Excimer Lasers. *rp-photonics.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/excimer_lasers.html
- [14] Pulsed lasers. *rp-photonics.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/pulsed_lasers.html
- [15] NĚMEČEK, Stanislav. *Laserové technologie* [online]. 15.6.2013, cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/17401536-Laserove-technologie.html>
- [16] ŠVÁBEK, Roman. Lasery s krátkými pulsy pro povrchové úpravy. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2016, č. 12 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z:

<https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-s-kratkymi-pulzy-pro-povrchove-upravy>

- [17] BRAJER, Jan. Výrobní laserové technologie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2019, č. 11 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobni-laserove-technologie>
- [18] Možné dělení typů a druhů laserů. *lt.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [19] Ytterbium-doped Gain Media. *rp-photonics.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/ytterbium_doped_gain_media.html
- [20] WALLACE John. Direct-diode Lasers: Direct-diode laser systems for materials processing show their power and efficiency. *Laser Focus World* [online]. 2019, [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/14068988/directdiode-laser-systems-for-materials-processing-show-their-power-and-efficiency>
- [21] [Řezání tabule plechu CO₂ laserem]. In: *dita.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.dita.cz/divize-kovo>
- [22] ŠMÍD, Jiří. Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, č. 3 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser>
- [23] PETERKA, Pavel, Pavel HONZÁTKO a Ivan KAŠÍK. Vláknové lasery: nový nástroj pro průmysl a medicínu. *Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR* [online]. 2015, č. 5 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.ufe.cz/sites/default/files/peterka/fjfi/15_peterka_honzatko_kasik_ccf-vlaknove_lasery.pdf
- [24] Princip vláknového – FIBER LASERU. *lt.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
- [25] Rütering, Marus. Co rozhoduje při volbě typu laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, č. 9 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru>
- [26] ŠMÍD, Jiří. Leštění povrchu laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, č. 4 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lesteni-povrchu-laserem>
- [27] CO₂ Lasers. *rp-photonics.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/co2_lasers.html?s=ak
- [28] Princip CO₂ laseru. *lt.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>

- [29] NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, č. 9 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi>
- [30] TŮMA, Petr a Dagmar SMRČINOVÁ. Využití laseru při dělení a značení materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, č. 5 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyuziti-laseru-pri-deleni-a-znaceni-materialu>
- [31] DELIŠ, Martin. Pevnolátkové vs. plynové lasery – výroba komponent hnacích ústrojí pomocí laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2016, č. 9 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pevnolatkove-vs-plynove-lasery-vyroba-komponent-hnacich-ustroji-pomoci-laseru>
- [32] DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. In: *mega-blog.cz* [online]. 28.2.2013 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu>
- [33] YAG Lasers. *rp-photonics.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html
- [34] Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red. *lt.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [35] SHARMA Amit a Vinod Yadava. Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials – A review. *Optics & Laser Technology* [online]. 2018, vol. 98, 264-280 [cit. 2021-05-20]. ISSN 0030-3992. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399216313068>
- [36] Difference between fiber laser cutting machine and YAG laser cutting machine. *sohocutting.com* [online]. 14.7.2016 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://sohocutting.com/difference-fiber-laser-cutting-machine-yag-laser-cutting-machine/>
- [37] Thin-disk Lasers. *rp-photonics.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.html
- [38] WHAT IS A DISK LASER? *twi-global.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-a-disk-laser>
- [39] Fiber vs. Disk: Which Laser Will Make the Cut? *photonics.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.photonics.com/Articles/Fiber_vs_Disk_Which_Laser_Will_Make_the_Cut/a47616

- [40] Diskový. In: *lao.cz* [online]. 19. 02. 2013 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [41] KUSALA, Jaroslav. Konstrukce laserů. In: *cez.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/f4.htm>
- [42] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění – 4. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 3 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-4-dil>
- [43] Direct Diode Lasers. *rp-photonics.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/direct-diode-lasers.html>
- [44] ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 7,8 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl>
- [45] SAUCEDO Francisco, Bien CHANN, Bryce SAMSON a Parviz TAYEBATI. Direct diode vs. other laser systems used in laser cutting. *Industrial Laser Solutions* [online]. 2016, [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/cutting/article/16485637/direct-diode-vs-other-laser-systems-used-in-laser-cutting>
- [46] Riveiro, Antonio & Quintero, Felix & Boutinguiza, Mohamed & del Val, J. & Comesaña, Rafael & Lusquiños, Fernando & Pou, Juan. Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. *Materials* [online]. 2019, [cit. 2021-05-20]. 12. 157. 10.3390/ma12010157. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/330255882_Laser_Cutting_A_Review_on_the_Influence_of_Assist_Gas
- [47] MRŇA, Libor. Povrchové kalení laserem a Navařování laserem [přednáška]. Brno: VUT FSI, ústav strojírenské technologie. In: *ust.fme.vutbr.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv-specialni-metody-svarovani-kaleni-a-navarovani-laserem-2020-mrna.pdf>
- [48] FARMTEC a.s., Tisová 326; 391 33 Jistebnice. Návod k obsluze – FARMTEC v.1.0. ŘÍZENÉ STROJE, s.r.o., 2010. [cit. 2021-05-20].
- [49] Genna, S.; Menna, E.; Rubino, G.; Tagliaferri, V. Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality. *Appl. Sci.* [online] 2020, 10, 4956. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app10144956>
- [50] ŘEŘUCHA, Jan. Laserové řezání: zavedený standard v průmyslu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2018, č. 1,2 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-rezani-zavedeny-standard-v-prumyslu>

- [51] Tavné řezání. *trumpf.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/laserove-rezani/tavne-rezani/
- [52] Powell, John & Petring, Dirk & Kumar, Ramachandran & Mashikhi, Saeed & Kaplan, A & Voisey. Laser-oxygen cutting of mild steel: The thermodynamics of the oxidation reaction. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 2008 [cit. 2021-05-20]. DOI: 10.1088/0022-3727/42/1/015504. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/42/1/015504>
- [53] Orazi, L.; Darwish, M.; Reggiani, B. Investigation on the Inert Gas-Assisted Laser Cutting Performances and Quality Using Supersonic Nozzles. *Metals* [online]. 2019, [cit. 2021-05-20]. DOI: 10.3390/met9121257. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/12/1257>
- [54] Laser Cutting Methods (4 types). *machinemfg.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.machinemfg.com/laser-cutting-methods/>
- [55] Sublimační řezání. *trumpf.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/laserove-rezani/sublimacni-rezani/
- [56] Bhattacharyya, Bijoy a Biswanath DOLOI. *MODERN MACHINING TECHNOLOGY: advanced, hybrid, micro machining and super finishing technology*. Academic Press, 2019, 780 s. [cit. 2021-05-20]. ISBN 9780128128954. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMMTAHMM9/viewerType:toc/>
- [57] KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (LASER CUTTING). In: *lao.cz* [online]. 19. 02. 2013 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [58] Koç, Muammer a Tugrul Özel. *Modern Manufacturing Processes*. Wiley. 2019, 506 s. [cit. 2021-05-20]. ISBN 978-1118071922. Dostupné také z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMMP00011/viewerType:toc//root_slug:modern-manufacturing/url_slug:laser-mach-drilling?b-q=Laser%20Cutting%20Process&b-subscription=true&b-group-by=true&b-sort-on=default&b-content-type=references&include_synonyms=no&issue_id=kt0125HU51&hierarchy=kt00A1VOO5
- [59] ION, John. *Laser Processing of Engineering Materials - Principles, Procedure and Industrial Application*. Elsevier Ltd. 2005, 576 s. [cit. 2021-05-20]. ISBN 978-0-7506-6079-2. Dostupné také z: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpLPEMPPI2/cid:kt00BJOQX1/viewerType:khtml//root_slug:14-

25th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics [online]. 2006, [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/284931648_Cutting_of_stainless_steel_with_fiber_and_disk_laser

- [67] Stelzer, Sebastian & Mahrle, Achim & Wetzig, Andreas & Beyer, Eckhard. Experimental investigations on fusion cutting stainless steel with fiber and CO2 laser beams. *Physics Procedia* [online]. 2013, [cit. 2021-05-20]. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.093. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/258977925_Experimental_Investigations_on_Fusion_Cutting_Stainless_Steel_with_Fiber_and_CO2_Laser_Beams
- [68] Zavala Arredondo, Miguel Angel & Boone, Nicholas & Willmott, Jon & Childs, David & Ivanov, Pavlo & Groom, Kristian & Mumtaz, Kamran. Laser Diode Area Melting for High Speed Additive Manufacturing of Metallic Components. *Materials & Design*. [online]. 2017, [cit. 2021-05-20]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.12.095. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/312316356_Laser_Diode_Area_Melting_for_High_Speed_Additive_Manufacturing_of_Metallic_Components
- [69] Porovnání tepelné vodivosti mědi, hliníku a mosazi. *fyzikalnipokusy.cz* [online] [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://fyzikalnipokusy.cz/1652/porovnaní-tepelne-vodivosti-medi,-hliniku-a-mosazi>
- [70] Barbara Previtali, Giovanni Riva, Erica Librera, Stefano Filios, Maurizio Sbetti, Mattia Vanin, Giacomo Biscaglia, Francisco Villarreal, Bien Chann, and Bryan Lochman. Laser cutting of copper and brass alloys by high brilliance diode source with an extremely low BPP. *ICALEO*. [online]. 2015, [cit. 2021-05-20]. DOI: 10.2351/1.5063246. Dostupné z: <https://lia.scitation.org/doi/abs/10.2351/1.5063246>
- [71] KOŠTÁL, Jan. POUŽITÍ SLITIN TITANU. Brno, 2015. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=101927 Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Karel Němec.
- [72] FARMTEC a.s. In: *farmtec.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.farmtec.cz/uvod.html>
- [73] DITA výrobní družstvo invalidů. In: *dita.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.dita.cz/>
- [74] TruLaser 3030/3040. *trumpf.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/2d-laserove-rezaci-stroje/trulaser-30303040/
- [75] DC01. *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=199

- [76] Ocel pro stavební ocelové konstrukce. *stavba.tzb-info.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/13744-ocel-pro-stavebni-ocelove-konstrukce>
- [77] Steel S235JR. *metinvestholding.com* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://metinvestholding.com/en/products/steel-grades/s235jr>
- [78] Cr-Ni austenitická ocel odolná proti korozi. *techportal.cz* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBF_GAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXIrODF32bS3UUhLnzl00RA9x7p75N8MGgz73w

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
CNC	Computer numerical control
CO₂	Oxid uhličitý
CW	Continuous wave
FBG	Fiber Bragg grating
Nd:YAG	Yttrito-hlinitý granát dopovaný ionty Neodymu
RF	Radiofrekvenční
Yb:YAG	Yttrito-hlinitý granát dopovaný ionty Ytterbia

Symbol	Jednotka	Popis
BPP	[mm · mrad]	Beam parameter product
<i>l_r</i>	[mm]	Základní délka
<i>l_n</i>	[mm]	Celková délka
<i>n</i>	[mm]	Skruz
<i>r</i>	[mm]	Natavení horní hrany
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
Rz5	[μm]	Průměrná výška prvku profilu
<i>u</i>	[mm]	Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu
Z_t	[μm]	Výška prvků profilu

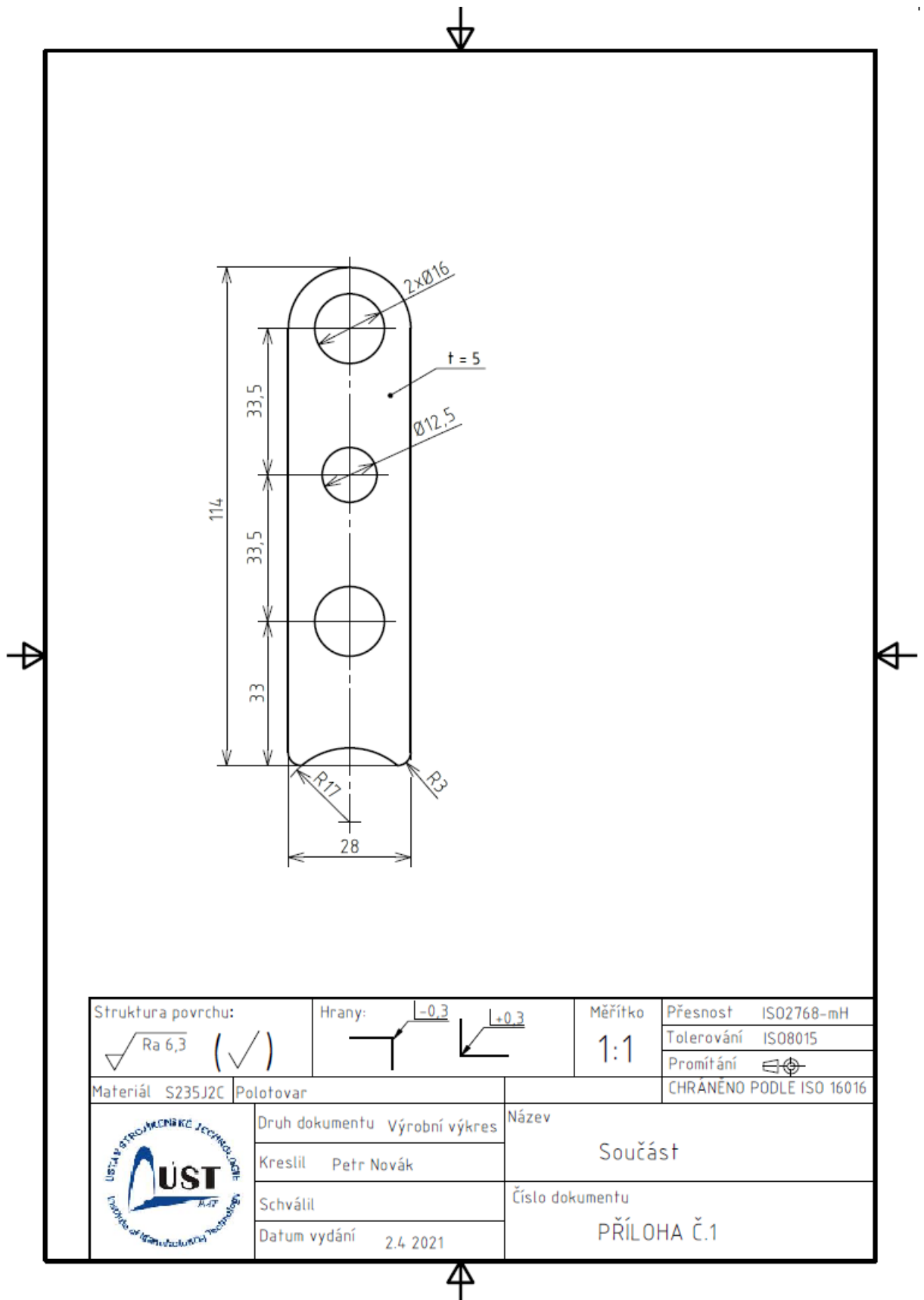
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 Výkres navržené součásti

PŘÍLOHA 2 NC program

PŘÍLOHA 3 Nářezový plán

PŘÍLOHA 1



Struktura povrchu: $Ra\ 6,3$ (✓)		Hrany: $-0,3$ $+0,3$	Měřítko 1:1	Přesnost ISO2768-mH
Materiál S235J2C Polotovár				Tolerování ISO8015
Druh dokumentu Výrobní výkres		Název Součást		Promítání
Kreslil Petr Novák		Číslo dokumentu PŘÍLOHA Č.1		
Schválil				
Datum vydání 2.4.2021				

PŘÍLOHA 2

M 1.0

P+0+0

P+17.90+109.64

+

R+18.03+110.77-148.281

R+18.01+104.01-119.910

R+18.01+104.01-239.822

-

P+18.18+74.39

+

R+18.36+75.51-148.278

R+18.01+70.51-119.885

R+18.01+70.51-239.770

-

P+18.18+42.63

+

R+18.36+43.76-148.281

R+18.01+37.01-119.910

R+18.01+37.01-239.822

-

P+4.20+115.56

+

P+7.02+113.00

R+18.01+104.01+39.318

P+3.81+6.84

R+7.01+6.84+73.236

R+18.01-7.84-91.466

R+29.01+6.84+73.236

P+32.21+104.01

R+18.01+104.01+135.811

-

PŘÍLOHA 3

