



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

LASEROVÉ ŘEZÁNÍ LEHKÝCH A BAREVNÝCH KOVŮ

LASER CUTTING OF LIGHT AND NON-FERROUS METALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Mikuláš Krucina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Osička, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Mikuláš Krucina**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Karel Osička, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Laserové řezání lehkých a barevných kovů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provedení rozboru technologických možností laserového řezání plechů na bázi lehkých a barevných kovů. Řezání tenkých plechů laserovým paprskem je velmi produktivní u běžných ocelových materiálů, kde nejsou problémy s odrazivostí paprsku. Jiná situace je u plechů z lehkých a barevných kovů, kde odrazivost paprsku laserovou technologií velmi omezuje.

Cíle diplomové práce:

Rozbor zadání.
Rozbor fyzikálního principu řezání laserem.
Technologické možnosti řezání laserem, omezení pro jednotlivé materiály.
Dostupné technologické možnosti jednotlivých laserových strojů ve firmě.
Návrh, provedení a vyhodnocení experimentu při řezání plechů na bázi lehkých a barevných kovů.
Racionalizace manipulace s materiálem.
Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.

BENKO, Bernard; FODREK, Peter; KOSEČEK, Miroslav a BIELAK, Robert, . I. Laserové technológie, 1.vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859. ISBN 80-227-1425-9.

CARISTAN, Charles L. Laser cutting guide for manufacturing. 1th ed. Michigan: SME, 2004. 447s. ISBN 978-0-87263-686-6.

KOCMAN, Karel a PROKOP, Jaroslav. Technologie obrábění. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Problematika, které se věnuje tato diplomová práce je řezání lehkých a barevných kovů pomocí laseru. Diplomová práce je rozdělena na rešeršní a experimentální část. Rešeršní část se zaměřovala na rozbor fyzikálního principu řezání laserem, technologické možnosti řezání laserem a omezení pro jednotlivé materiály. Experimentální část byla zaměřena na sledování vlivu rychlosti řezání, tlaku použitého plynu a výkonu stroje v závislosti na drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti vyrobených vzorků. Pro experiment byly zvoleny dva materiály. V případě všech vzorků byl pro dělení použit vláknový laser DURMA HD-F 3015BH. V první části experimentu byl sledován vliv vybraných parametrů laserového řezání u vzorků vyrobených z materiálu EN AW 5754 o tloušťce 3 mm. V druhé části experimentu byl použit materiál Cu-ETP o tloušťce 1 mm a také v tomto případě byl pozorován vliv vybraných parametrů laserového řezání. Poslední část této diplomové práce se zabývá zhodnocením procesu řezání z pohledu ekonomiky, kde byl proveden výpočet ceny za metr řezu a hodinové sazby laseru pro daný materiál.

Klíčová slova

laser, řezání laserem, vláknový laser, lehké kovy, barevné kovy

ABSTRACT

The problem dealt with in this thesis is laser cutting of light and non-ferrous metals. The thesis is divided into research and experimental parts. The research part focused on the analysis of the physical principle of laser cutting, technological possibilities of laser cutting and limitations for individual materials. The experimental part was focused on monitoring the effect of cutting speed, gas pressure and machine power on the surface roughness and dimensional accuracy of the fabricated samples. Two materials were chosen for the experiment. For all samples, a DURMA HD-F 3015BH fibre laser was used for cutting. In the first part of the experiment the influence of selected laser cutting parameters was investigated for samples made of EN AW 5754 material with a thickness of 3 mm. In the second part of the experiment, Cu-ETP material with a thickness of 1 mm was used and the influence of the selected laser cutting parameters was also observed in this case. The last part of this thesis deals with the evaluation of the cutting process from an economical point of view, where the price per meter of cutting and the hourly laser rate for the material were calculated.

Keywords

laser, laser cutting, fibre laser, light metals, non-ferrous metals

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRUCINA, Mikuláš. *Laserové řezání lehkých a barevných kovů* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157809>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Laserové řezání lehkých a barevných kovů vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Český Těšín, 24. 5. 2024

místo, datum

Mikuláš Krucina

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat firmě VOP GROUP, s.r.o. za umožnění použití laserového stroje a poskytnutí všech informací.

Poděkování patří také panu Ing. Vilému Widenkovi, MBA za cenné rady a připomínky.

V poslední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE	11
2.1 Základní princip laseru	11
2.2 Vlastnosti laserového paprsku a popis vlnové délky.....	13
2.3 Řezání laserem a jeho metody	14
3 ROZDĚLENÍ LASERŮ	17
3.1 Rozdělení laserů podle druhu aktivního prostředí.....	18
3.2 Rozdělení podle typu excitace a režimu provozu.....	25
3.3 Rozbor materiálů řezaných laserem	26
4 TECHNOLOGICKÉ VYBAVENÍ FIRMY	31
4.1 Laserové stroje a ohraňovací lis využívané firmou	31
4.2 Manipulace s materiálem.....	34
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	36
5.1 Výběr materiálových představitelů pro experiment	36
5.2 Měření vzorků	37
5.3 Experiment část 1.	41
5.4 Experiment část 2.	47
6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ	55
ZÁVĚR.....	60

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

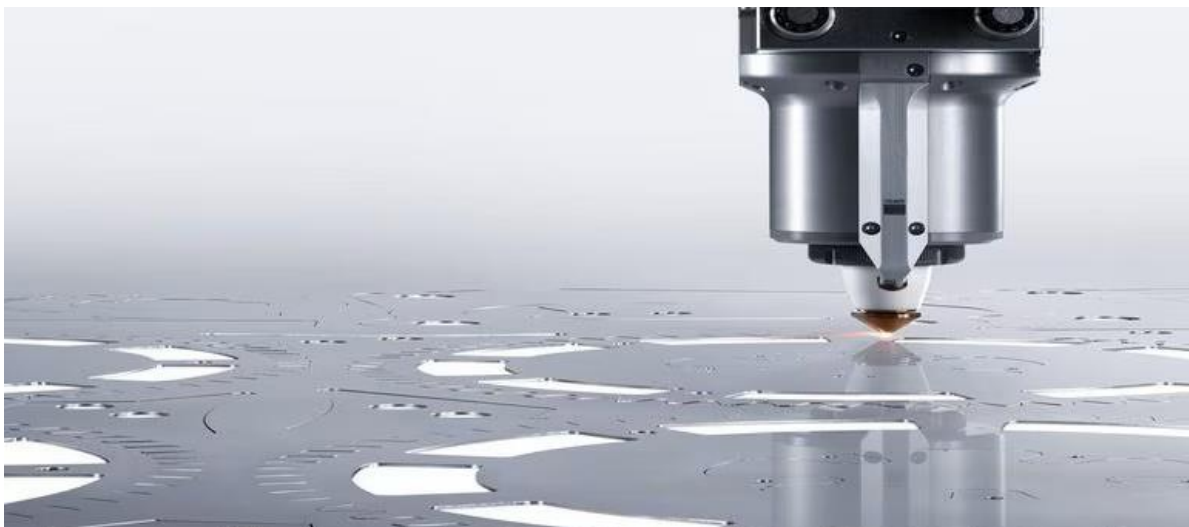
Seznam příloh

ÚVOD

Laser od doby svého vzniku postupně pronikl do všech možných odvětví lidské činnosti a stal se neodmyslitelnou součástí průmyslových a technologických procesů. Oblast použití laseru je velmi rozmanitá a své hlavní využití nalézá v průmyslu, medicíně, elektronice, vědě a výzkumu, zábavním průmyslu a také i ve zcela běžných věcech jako jsou například laserová ukazovátka. V průmyslu se začalo využívat laserového záření téměř okamžitě po sestrojení prvního laseru. S neustálým rozvojem vědy a techniky laserové technologie v dnešní době zastávají důležité místo v oblasti strojírenství, jelikož umožňují zpracovávat kovové i nekovové materiály s výbornou kvalitou. Ve strojírenství se lasery používají například k povrchovým úpravám, tepelnému zpracování, svařování, tvorbě modelů a prototypů (rapid prototyping), vrtání a v neposlední řadě k řezání. [1; 2; 3; 4]

Obrábění laserem se řadí mezi nekonvenční technologie obrábění, jež jsou založeny na využití fyzikálního, nebo chemického principu úběru materiálu. V případě těchto metod se nepoužívá standardní rezný nástroj, u kterého je možné definovat pracovní části nebo nástrojové úhly. V průběhu obrábění nedochází k tvorbě klasických třísek, jako tomu je například u soustružení nebo frézování. K úběru materiálu dochází účinky tepelnými, chemickými, případně i abrazivními nebo jejich kombinací. Mezi další nekonvenční metody se řadí například obrábění plazmou, obrábění vodním paprskem, obrábění ultrazvukem, obrábění paprskem elektronů a elektroerozivní obrábění. [5; 6; 7]

Technologie laserového řezání (obr. 1) představuje nejrozšířenější laserovou technologii a zároveň zaujímá důležitou pozici v moderní výrobě díky vysoké přesnosti, efektivitě, malému tepelnému ovlivnění materiálu a rychlosti. Dále tato technologie umožňuje řezání širokého spektra materiálů, ale ne všechny materiály jsou stejně vhodné pro řezání laserem, jelikož existují také určitá omezení u laserových řezacích strojů. Například při řezání hliníku a mědi může docházet ke špatným výsledkům řezání nebo dokonce k poškození stroje, jelikož hliník a měď se řadí mezi vysoce reflexní materiály a většinu laserové energie budou odrážet. Z tohoto důvodu je nutné použití vhodného laseru a správné nastavení parametrů pro řezání, aby bylo dosaženo co nejlepšího výsledku. Touto problematikou se zabývá tato diplomová práce. [3; 8; 9]

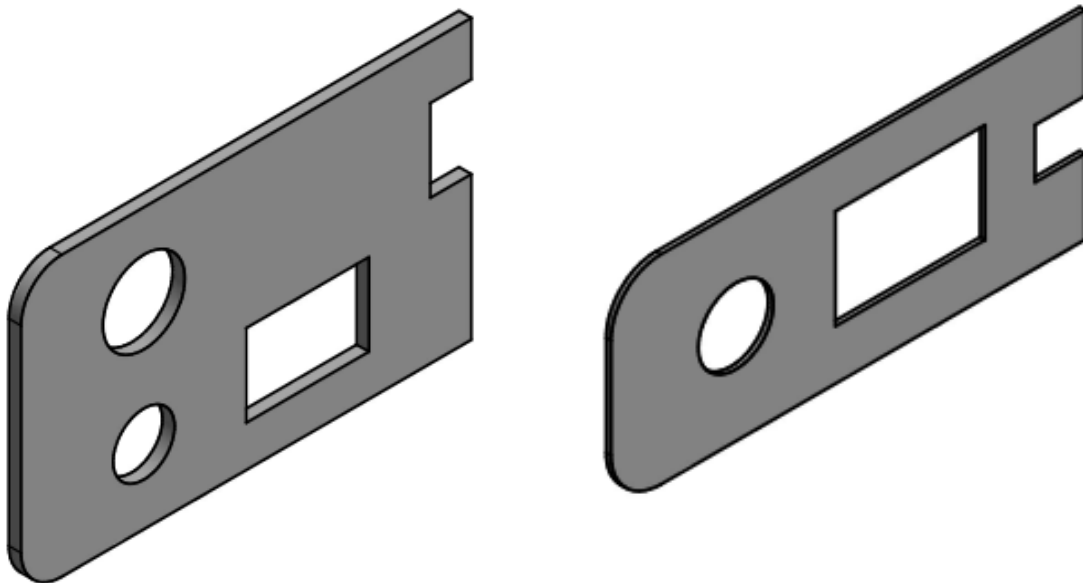


Obr. 1 Řezání pomocí laseru [10].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Laserové řezání představuje nejrozšířenější laserovou technologii, která umožňuje řezat kovové a nekovové materiály s různou tloušťkou. Ne všechny materiály jsou stejně vhodné pro řezání na laserovém stroji a mezi hůře řezané materiály se řadí například vysoce reflexní materiály, průhledné materiály, reaktivní materiály a vícevrstvé kompozity. V současné době existuje mnoho typů laserových řezacích strojů a pro dosažení co nejlepšího výsledku při řezání je klíčová volba správného laseru a nastavení řezných parametrů, což se odvíjí od zpracovávaného materiálu. [3; 9; 11]

Následující kapitoly obsahují základní informace zabývající se řešenou problematikou a experimentální část je zaměřena na řezání lehkých a barevných kovů. Pro experiment byl zvolen vláknový laser a bylo vyrobeno několik vzorků ze slitiny hliníku a následně několik vzorků z mědi. V průběhu výroby jednotlivých vzorků docházelo k měnění některých řezných parametrů, a to přesněji řezné rychlosti, výkonu laseru a tlaku použitého plynu. Na vyrobených vzorcích byl sledován vliv těchto řezných parametrů v závislosti na drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti. Na obrázku 2 jsou zobrazeny tvary vzorků, které byly v experimentu řezány.



Obr. 2 3D modely řezaných vzorků.

2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE

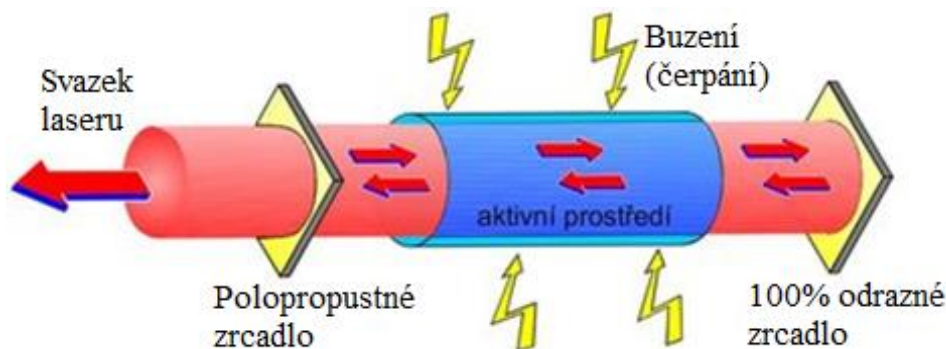
Na začátku této kapitoly je vhodné nejprve objasnit význam slova laser. Jedná se o zkratku z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser lze tedy zjednodušeně popsat jako zdroj světla nebo jako optický zesilovač generující elektromagnetické záření, které vzniká pomocí procesu stimulované emise. [1; 12]

Lasery jsou v dnešní době využívány ve velké míře, a to v mnoha oblastech, jako například v průmyslu, medicíně, elektronice a dalších. Důvodem, proč jsou lasery tolik používány jsou jejich schopnosti, mezi které se řadí například rychlost procesu obrábění, vysoká flexibilita, nízká hluchost, minimální tepelné ovlivnění okolního materiálu. Záření, kterými disponují lasery mají zcela unikátní vlastnosti v porovnání se záření z běžných zdrojů světla, což je třeba žárovka. Světlo laseru je totiž monochromatické, koherentní a má nízkou divergenci. [1; 12; 13; 14]

Obrábění laserem, které je založeno na přeměně světelné energie na tepelnou energii, se řadí mezi nekonvenční metody obrábění. U těchto metod je charakteristické že, nedochází ke vzájemnému styku nástroje s obráběným materiálem. Laser se v technologii používá pro několik typů operací, a to pro svařování, pájení, vyřezávání, popisování součástí, tepelné zpracování, nanášení povlaků, vrtání, soustružení, frézování, gravírování a řezání, což je nejrozšířenější laserovou technologií. Dále může být laser využit také k tvorbě modelů a prototypů. [4; 8; 14; 15; 16]

2.1 Základní princip laseru

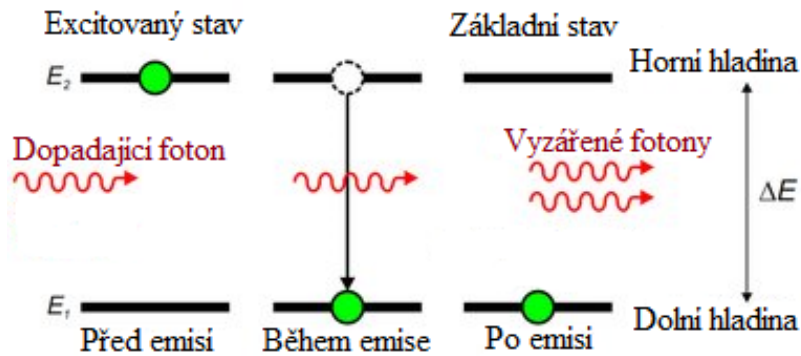
Základem laseru je aktivní prostředí, které může být buzeno několika způsoby jako například opticky a elektricky. Buzení se využívá k dodání energie do laseru, která je následně pomocí procesu stimulované emise vyzářena v podobě laserového svazku, k čemuž je zároveň také zapotřebí optického rezonátoru, který je nejčastěji tvořen odraznými zrcadly. Vznik světla je založen na principu přechodů například atomů z vyššího energetického stavu do nižšího, a proto je zapotřebí buzení. Obecné schéma laseru je zobrazeno na obr. 3. [1; 17]



Obr. 3 Obecné schéma laseru [1].

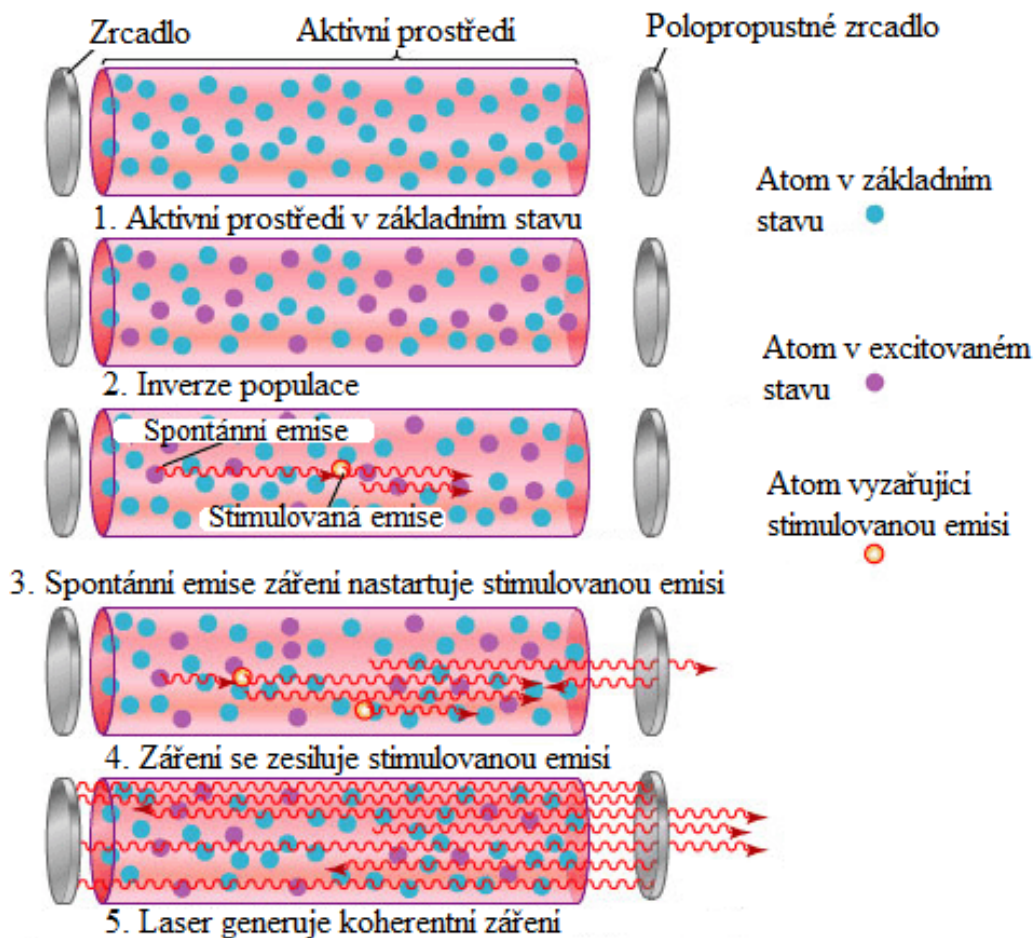
Jak již bylo zmíněno základním prvkem laseru je aktivní prostředí, které obsahuje nějaký element. Vlastnost tohoto elementu je ta, že se může nacházet v základním stavu s nižší energií nebo ve stavu excitovaném s vyšší energií. Tento element nejčastěji představuje atom, ale může to být například také vibrační stav molekuly nebo chemická vazba. Pokud dojde k přechodu z vyššího energetického stavu do nižšího, vyzáří se foton neboli kvantum elektromagnetického záření. Buzením dojde k přivedení energie a aktivní prostředí se dostane do excitovaného stavu, kde se většina elementů nachází ve vyšším energetickém stavu. Tento stav se označuje jako inverze populace. Prostředí má snahu vždy zaujímat stav termodynamické rovnováhy, a proto nejdříve dojde ke spontánní emisi. Spontánní emisi si lze představit jako samovolný přechod

elementu z vyšší energetické hladiny do nižší současně při vyzáření fotonu. Takto vyzážené fotony dále slouží k nastartování již stimulované emise (obr. 4). Tento proces je v podstatě lavinovitý efekt, kde foton dopadá na excitovaný element a tím stimuluje jeho přechod z horní energetické hladiny na dolní, přičemž dojde k vyzáření dalšího fotonu. [1; 17]



Obr. 4 Princip stimulované emise [1].

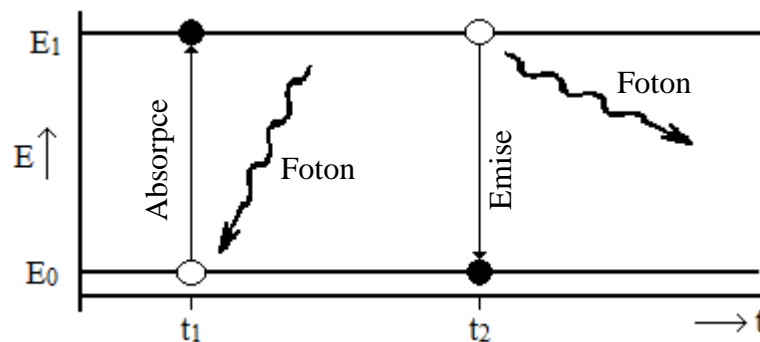
Fotony se pohybují v rezonátoru mezi dvěma zrcadly, kde část fotonů se odrazí a část projde polopropustným zrcadlem. Jejich počet narůstá uvnitř aktivního prostředí a dochází k uvolnění energie v podobě proudu fotonů (obr. 5). Vyzážené fotony uvnitř aktivního prostředí nemají vždy směr pohybu ve směru osy trubice. Tyto fotony nepohybující se ve směru osy po několika odrazech uniknou ven bez užitku a děje se dále neúčastní. [1; 16; 17]



Obr. 5 Proces vzniku laserového záření [1].

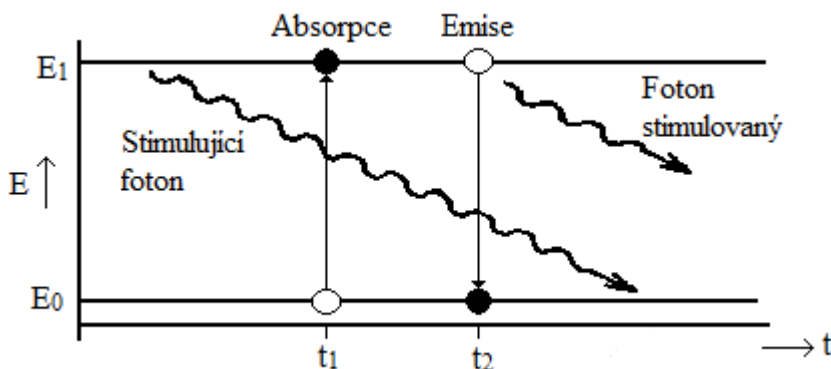
Fyzikální charakteristika laseru

Laserové světlo vzniká v prostředí elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vynucené emise záření. Princip spontánní emise (obr. 6) lze popsat na modelu jednoduché kvantové soustavy, při uvažování pouze dvou energetických hladin E_0 a E_1 . Na obrázku níže je na svislé ose vynášena energie a na vodorovné ose čas. V okamžiku t_1 je kvantovou soustavou absorbován foton, jehož energie musí být rovna rozdílu energií obou uvažovaných energetických hladin, jinak by k absorbování fotonu nemohlo dojít. Soustava se dostane do excitovaného stavu a po krátkém časovém intervalu přejde soustava v okamžiku t_2 do základního stavu. Jedná se o přeskok elektronu mezi stejnými energetickými hladinami, a proto má vyzářené světelné kvantum takovou energii jaká byla absorbována v okamžiku t_1 (absorbované i emitované světlo má stejnou vlnovou délku). [16; 18]



Obr. 6 Spontánní emise [18].

Stimulovaná emise (obr. 7) může být znovu popsána na příkladu kvantové soustavy se dvěma energetickými hladinami. V okamžiku t_1 dojde k excitaci soustavy. Do soustavy je přiveden foton v čase t_2 , tento okamžik t_2 předchází vzniku spontánní emise, s energií rovnou rozdílu uvažovaných energetických hladin. Soustava přejde do základního stavu už v okamžiku t_2 a dojde k vyzáření fotonu, který má stejnou energii, stejný směr šíření, stejnou fázi i polarizaci vlnění jako stimulující foton. Stimulující foton soustavou pouze prošel, nepohltil se. [16; 18]



Obr. 7 Stimulovaná emise [18].

2.2 Vlastnosti laserového paprsku a popis vlnové délky

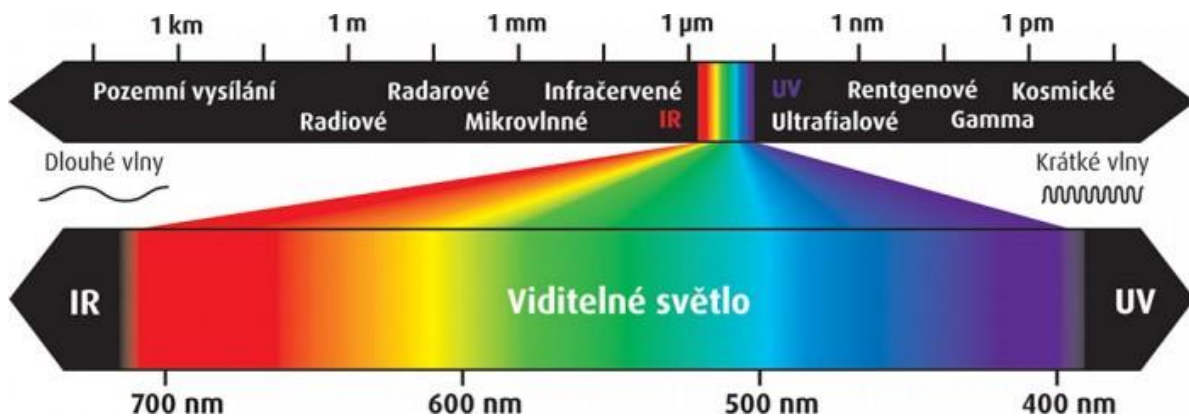
Vlastnosti laserového svazku vychází z principu, že stimulovaný foton vzniklý procesem stimulované emise má stejnou energii, stejný směr, polarizaci a fázi jako foton stimulující. Za těchto předpokladů je možné definovat základní vlastnosti laserového paprsku, které jsou [1; 16]:

- **Kolimovanost**, což znamená, že svazek laseru se nerozbíhá nebo jen velmi nepatrně.

- Paprsek má **monochromatický** charakter neboli má jen jednu vlnovou délku.
- Paprsek je **koherentní**, a tedy vzniklé fotony jsou ve fázi časové i prostorové.

Díky těmto vlastnostem je laser používán pro mnoho různých aplikací. V průmyslových aplikacích se využívá převážně schopnost fokusovat paprsek laseru do bodu o velmi malé ploše, čímž se dosáhne vysoké plošné hustoty energie. V porovnání se světlem z běžného zdroje světla, což je například žárovka, kde se generované fotony rozbíhají do různých směrů, mají různou vlnovou délku a náhodnou fázi. [1; 16]

Pro účinné využití a práci laserů pro různé aplikace je důležitá volba vlnové délky záření. Materiály se liší svými vlastnostmi, a tedy i absorpcí, což je schopnost materiálu pohlcovat světelnou energii, jež znamená, že jednotlivé materiály efektivně absorbují laserové záření s určitou vlnovou délkou. Druhy elektromagnetického záření (obr. 8) se rozdělují podle vlnové délky a zdroje záření. Záření s vyšší hodnotou vlnové délky má nižší frekvenci a záření s nižší hodnotou vlnové délky má zase vyšší frekvenci. Tyto jednotlivé typy záření mají své typické vlastnosti a oblasti využití. Viditelné světlo, které může člověk vnímat zrakem, se pohybuje v rozsahu vlnových délek přibližně od 380 nm do 780 nm. [15; 19; 20; 21; 22]

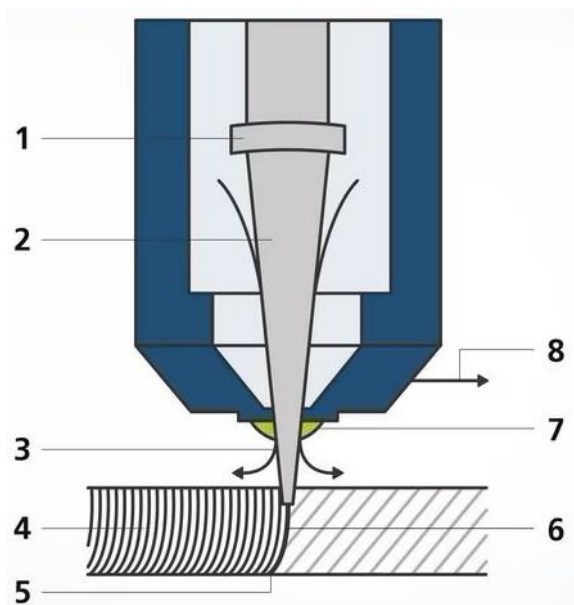


Obr. 8 Elektromagnetické spektrum [22].

2.3 Řezání laserem a jeho metody

Řezání se řadí mezi nejrozšířenější laserovou technologii. Jedná se o bezkontaktní proces oddělování, kde nedochází ke vzájemnému kontaktu mezi nástrojem a obrobkem. Z toho plyne, že k opotřebování nástroje, deformacím nebo poškození obrobku nedojde. Je možné řezat širokou škálu materiálu, a to jak kovové, tak i nekovové materiály s různou tloušťkou. [8; 9]

Laserový paprsek je veden, tvarován a sdružen do svazku, který je soustředěn na jeden určitý bod o velmi malém průměru, a tím se dosáhne velké hustoty energie na malé ploše. Paprsek zahřívá materiál pouze v definovaném místě a ostatní části obrobku zůstávají tepelně neovlivněny nebo jen minimálně. Spára vzniklá během procesu není širší než paprsek a dílce je možné řezat hladce a bez otřepů, což má za následek ve většině případů vyřazení následných dodatečných úprav. Jelikož se jedná o bezkontaktní způsob dělení, kde nevznikají reakční síly působící na obrobek nebo nástroj, nároky na upínání jsou minimální. Z celkového hlediska tato metoda řezání je velmi flexibilní a její použití je vhodné i pro malé série a tvorbu různých prototypů. Proces laserového řezání je popsán na obr. 9. [2; 9; 23]



- 1 – zaostřovací optika,
- 2 – laserový paprsek,
- 3 – řezný plyn,
- 4 – řezné rýhy,
- 5 – tavenina,
- 6 – čelní strana obrobku,
- 7 – tryska,
- 8 – směr řezu.

Obr. 9 Proces laserového řezání [9].

V průběhu laserového řezání dochází ke třem jednotlivým procesům. Během operace dochází ve většině případů ke kombinaci některých z nich. Jedná se o tyto procesy [8; 9]:

- oxidační řezání,
- tavné řezání,
- sublimační řezání.

Oxidační řezání

Tato metoda umožňuje velmi vysoké rychlosti řezání, řezání tlustých plechů a konstrukčních ocelí. Kyslík, který se využívá jako řezný plyn, je vyfukován do řezné mezery tlakem až 6 bar, kde roztavený kov shoří. Energie uvolněná touto reakcí podporuje laserový paprsek. Nevýhodou je fakt, že kvalita řezné hrany není tak vysoká jako u sublimačního a tavného řezání a také u této metody je tepelně ovlivněná oblast větší. [8; 9; 16]

Tavné řezání

Princip tavného řezání spočívá v natavení materiálu a jeho následného vyfouknutí z řezné spáry proudem inertního plynu. Jako inertní plyn se využívá argon nebo dusík, který je hnán řeznou mezerou tlakem 2 až 20 bar. V porovnání s oxidačním řezáním tyto řezné plyny nereagují s kovovým povrchem v řezné mezeře a nedochází ke vzniku oxidů na povrchu řezné hrany. Hrany zůstávají bez otřepů a nejsou tedy nutné žádné dokončovací operace, což se řadí mezi výhody této metody. [8; 9; 16]

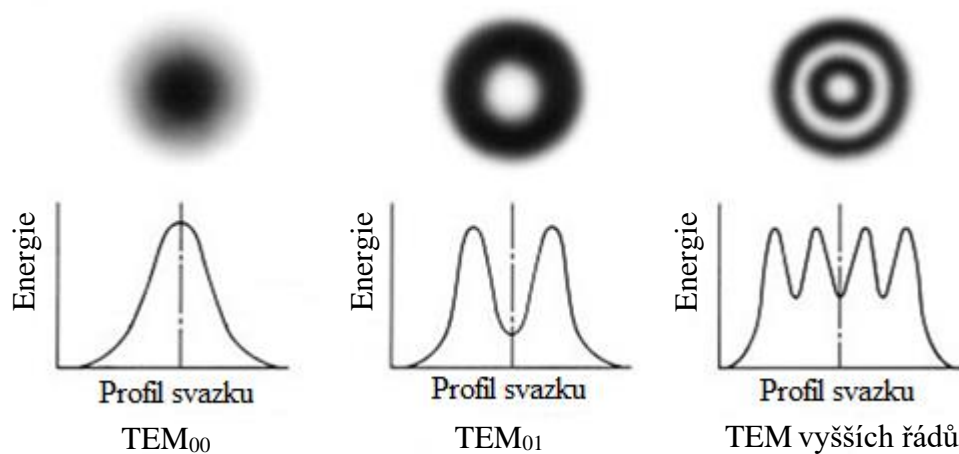
Sublimační řezání

U této metody řezání dochází k odpařování materiálu z místa řezu, pokud možno s minimálním tavením. Je nutné zajistit vysokou intenzitu laserového záření, které se dosahuje pomocí vhodných nastavení parametrů laseru a fokusační techniky, aby mohlo docházet k okamžitému odpařování materiálu. Vzniklé páry jsou odfukovány z řezu pomocí procesního plynu, který zároveň zajišťuje, aby nedocházelo k oxidaci povrchu řezných hran. Jako procesní plyny se využívají dusík, argon nebo hélium. Výhodou této metody je, že nedochází téměř k žádnému tavení materiálu a vzniklý řez je kvalitní, hladký a bez otřepů. Nevýhodou je nutnost vyššího výkonu. [8; 9; 16]

Parametry ovlivňující průběh laserového řezání [9; 24; 25; 26; 27]:

- Zaostření a průměr spotu – Zaostření ovlivňuje hustotu výkonu na povrchu obrobku a tvar řezné mezery, kdežto průměr udává šířku spáry a tvar řezné mezery.

- Výkon laseru – Aby došlo k překročení prahové hodnoty obrábění neboli bodu, ve kterém se materiál začíná tavit je nutné dodat určitou hodnotu energie na plochu. energii na ploše je možné popsat jako součin hustoty výkonu a doby působení na obrobek.
- Průměr trysky – Určuje tvar proudu a také množství proudícího plynu dopadajícího na obrobek.
- Pracovní režim – Na základě pracovního režimu se ovládá, jak se bude laserová energie dostávat do obrobku. Při použití kontinuálního režimu energie se bude dostávat plynule, kdežto v případě pulzního režimu se energie bude dostávat přerušovaně.
- Rychlost řezání – Na základě typu úlohy a zpracovávaném materiálu se určuje rychlost řezání. S vyšším výkonem laseru je možné dosahovat vyšších řezných rychlostí a s rostoucí tloušťkou materiálu naopak rychlost řezání klesá. Pokud bude řezná rychlost nastavena špatně, a to na příliš vysokou, nebo nízkou hodnotu bude docházet ke zvýšení drsnosti povrchu a tvorbě ořepů.
- Stupeň polarizace – Pokud laser kmitá paralelně se směrem řezu vytvořená hrana bude hladká. V opačném případě, pokud laser kmitá kolmo ke směru řezu dojde k vytvoření ořepů. Z tohoto důvodu se mění lineárně polarizované světlo CO₂ laseru na kruhově polarizované. Stupeň polarizace je tedy ukazatelem kvality řezu. U pevnolátkových laserů ke změně polarizace nedochází, jelikož výsledné řezání je nezávislé na směru.
- Řezné plyny a tlaky – Pro jednotlivé metody řezání se využívají různé druhy procesních plynů, které jsou hnány z trysky s laserovým paprskem pod různým tlakem. V případě použití argonu a dusíku nedochází k reakci s roztaveným kovem, čímž se zabraňuje vzniku oxidu.
- Poloha ohniska vůči obrobku – Určuje průměr paprsku, hustotu výkonu dopadajícího na povrch obrobku a tvar řezu.
- Módová struktura – Představuje profil laserového paprsku v příčném směru a popisuje rozložení výkonu napříč paprskem. Tvar módu je dán geometrickou konstrukcí rezonátoru a odvíjí se od nastavení zrcadel. Většina laserových aplikací vyžaduje paprsek se základním režimem TEM₀₀ s Gaussovým rozložením výkonu napříč svazkem, který představuje jeden velmi malý bod. Jedná se o nejvhodnější mód pro řezání, jelikož tento režim disponuje nejlepší kvalitou, nejmenším průměrem a divergencí paprsku. Na obrázku 10 jsou zobrazeny určité typy módů, včetně módu TEM₀₀.



Obr. 10 Schéma vybraných typů módů TEM [24].

3 ROZDĚLENÍ LASERŮ

Předchozí kapitola se zaměřovala na obecný princip fungování laserů a popis jednotlivých fyzikálních procesů, ke kterým dochází při samotném řezání laserem. Tato kapitola se zabývá přesněji rozdělením laserů na základě vybraných kritérií a rozborem materiálů řezaných pomocí laseru. V průmyslové oblasti existuje mnoho typů laserů (tab. 1) lišící se svou konstrukcí a vlastnostmi. Pro jejich rozdělení a začlenění do skupin je možné využít například kritéria z hlediska skupenství aktivního prostředí, čerpání, režimu práce, vlnové délky a počtu energetických hladin. Nejčastěji však dochází k rozdělení laserů na základě druhu aktivního prostředí, typu čerpání a režimu provozu [27; 28]:

- Rozdělení podle druhu aktivního prostředí:
 - plynové,
 - kapalinové,
 - pevnolátkové:
 - tyčové,
 - diskové,
 - vláknové,
 - polovodičové.
- Rozdělení podle typu čerpání:
 - elektrický výboj,
 - optické čerpání,
 - chemickou reakcí.
- Rozdělení podle režimu provozu:
 - pulzní,
 - kontinuální.

Tab. 1 Základní přehled průmyslových laserů [29].

Laser	Vlnová délka [nm]	Čer.	Úč.	Režim	Výkon	Aplikace	Životnost [h]
Nd:YAG	1 064	LD	~7 %	CW	až 6 kW	Ř, S	~10 000
				puls.	~100 W	Z, G	
		lampy	~3 %	puls.	~600 W	S	~1 000
CO ₂	10 600	RF	~10 %	CW/puls.	10-250 W	Z, G, Ř nk.	~20 000
					až 5 kW (slab)	Ř, S	
		El.	~25 %		až 20 kW (průtočné)	Ř, S	-
Diskový	1 070	LD	~15 %	CW	až 16 kW	Ř, S	~10 000
Vláknový	1 070	LD	~30 %	CW	až 80 kW	Ř, S	~100 000
				QCW	~1,2 kW	Z, G, M	
				puls.	~100 W	Z, G, M	
Diodový	808-980	El.	~60 %	CW	až 10 kW	S, K, N	~15 000

kde: Čer. – čerpání,
 Úč. – účinnost,
 LD – laserové diody,
 RF – rádio frekvenčně,
 El. – elektricky,
 CW – kontinuální,
 puls. – pulsní,
 QCW – kvazi kontinuální,

Ř – řezání,
 S – svařování,
 Z – značení,
 G – gravírování,
 K – kalení,
 N – nanášení vrstev,
 M – mikroobrábění,
 nk. – nekovů.

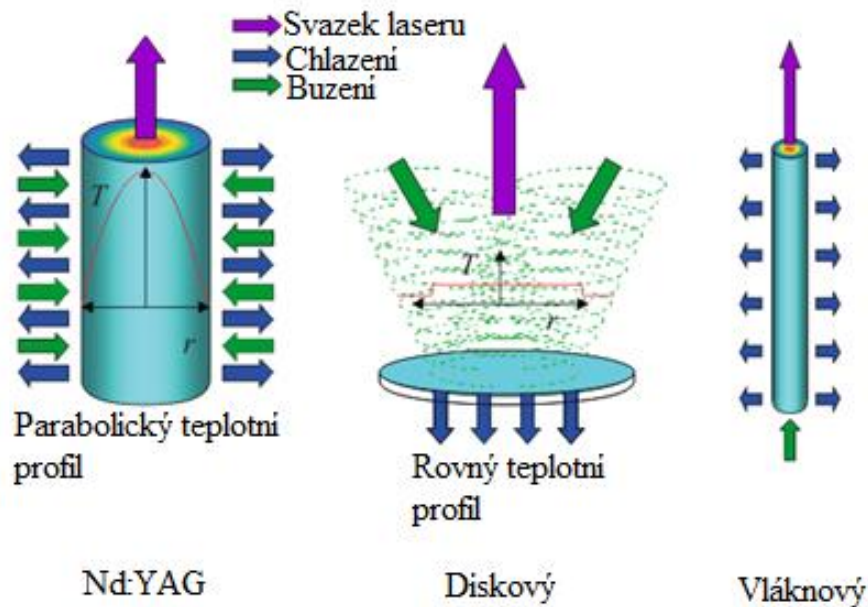
3.1 Rozdělení laserů podle druhu aktivního prostředí

Pevnolátkové lasery

Aktivním prostředím u těchto laserů jsou krystalické nebo amorfní izolanty s příměsí vhodných iontů, kde se v běžných případech využívá optického buzení, a to výbojkami nebo laserovými diodami. Původně se k buzení používaly výbojky, ale s postupem času se stále častěji začaly používat laserové diody z důvodu zisku kvalitnějšího svazku, vyšší účinnosti a delší doby životnosti. Výbojky se používají i nadále, jelikož jejich pořizovací náklady jsou nižší. Lasery jsou schopné pracovat v několika režimech a za různých provozních podmínek. Mezi výhody se řadí jejich stabilita a také nízké nároky na údržbu. Vlnové délky záření se pohybují v rozmezí infračerveného a viditelného světla. Nejznámějším a zároveň jedním z nejstarších typů těchto představitelů je rubínový laser, jehož aktivní prostředí je tvořeno krystalem syntetického rubínu. Jeho využití v průmyslové oblasti v současnosti, je ale výjimečné. Na základě svých vlastností jsou v dnešní době nejčastěji využívány lasery v provedení vláknovém nebo diskovém. [26; 30; 31; 32]

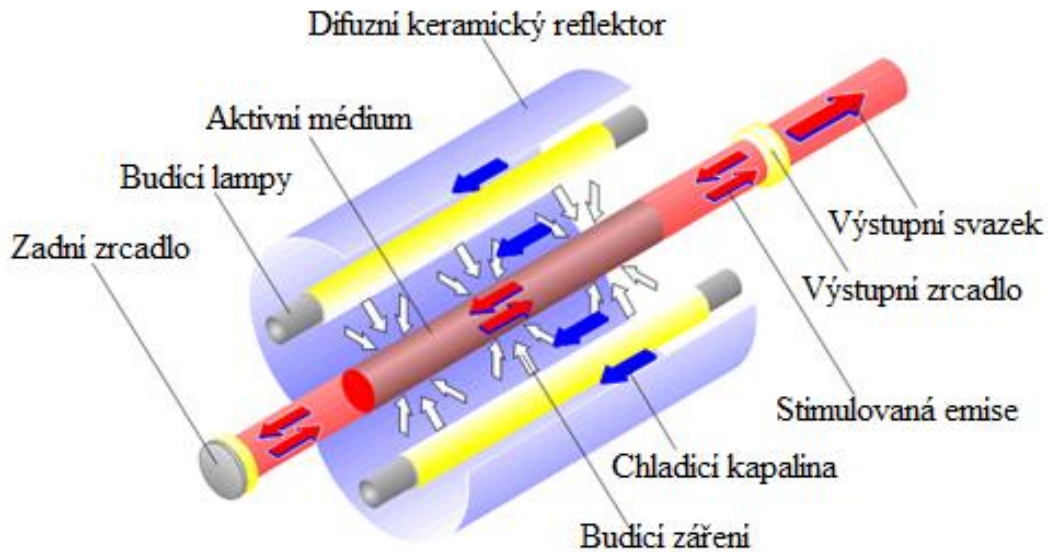
Nd:YAG, vláknový a diskový laser se řadí do skupiny pevnolátkových laserů, které vyzařují záření s vlnovou délkou přibližně 1 μm . Aktivním prostředím je matrice umělého YAG (ytrium

aluminium granát) krystalu dopovaného ionty neodymu nebo yterbia. Zásadním rozdílem mezi těmito typy je geometrie aktivního prostředí (obr. 11). V případě Nd:YAG laseru je aktivním prostředím tyčinka, u diskového provedení se jedná o tenký disk a u vláknového typu je to dlouhé optické vlákno. Jednou z hlavních výhod těchto laserů je možnost přenosu záření z laseru do místa obrábění pomocí optického vlákna, což je například výhodné u robotizovaných a automatizovaných pracovišť. [29; 33]



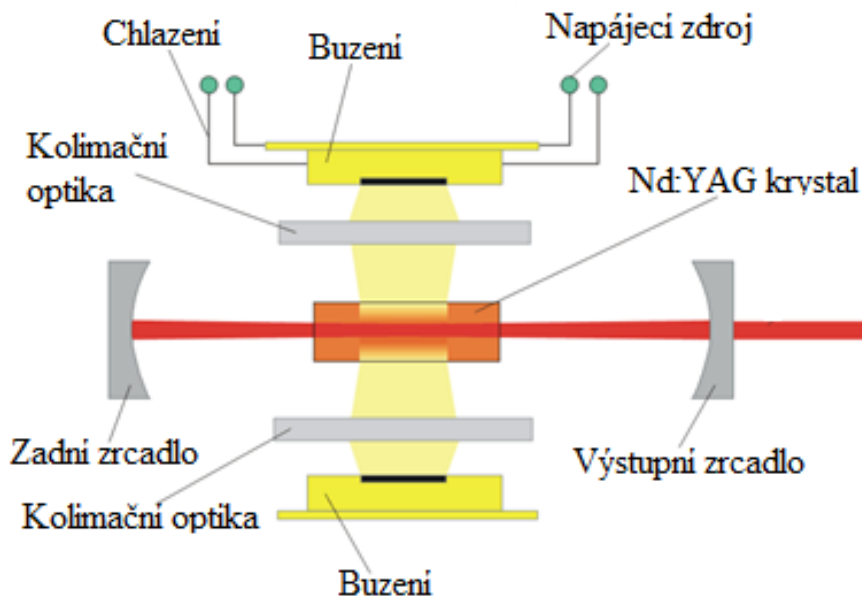
Obr. 11 Geometrie aktivních prostředí [29].

Z uvedených tří typů je nejstarší Nd:YAG laser. Tento typ je buzen buď výbojkami a označuje se LPSS (lamp pumped solid state) (obr. 12) nebo laserovými diodami, který se označuje DPSS (diode pumped solid state). LPSS Nd:YAG laser má nízkou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, jelikož velké množství energie dodané výbojkami se nevyužije a přemění se na teplo, což způsobuje nutnost zajištění chlazení. Při nedostatečném chlazení může dojít k zakřivení krystalu vlivem tepelného pnutí a tím dochází k degradaci módu záření. Mezi další nevýhody se také řadí krátká životnost výbojek a vysoké provozní náklady. Tento typ se převážně využívá v pulzním pracovním režimu pro svařování a vrtání, jelikož je možné dosáhnout vysoké energie v pulzu. [29; 31]

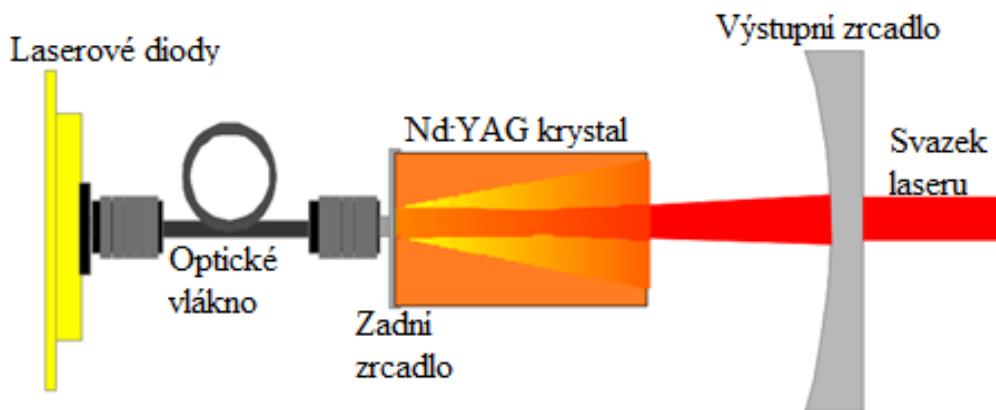


Obr. 12 LPSS Nd:YAG laser [29].

V případě DPSS Nd:YAG laseru se buzení rozděluje na dva hlavní typy a to podle uspořádání rezonátoru, na boční buzení (obr. 13) a zadní buzení (obr. 14). U zadního buzení dochází k vedení budícího záření z laserových diod do krystalu prostřednictvím optického vlákna, což umožňuje umístění diod mimo rezonátor. Při využití zadního buzení se dosahuje lepší kvality svazku a nižších výkonů, kdežto u bočního buzení se dosahuje horší kvality svazku a vyšších výkonů. DPSS Nd:YAG lasery se používají převážně v Q – spínaném pulzním režimu, kde laser generuje pulzy v řádech nanosekund a průměrný výkon se pohybuje do 100 W. DPSS Nd:YAG v porovnání s LPSS Nd:YAG lasery vykazují vyšší účinnost, delší životnost a nižší nároky na chlazení. [29]

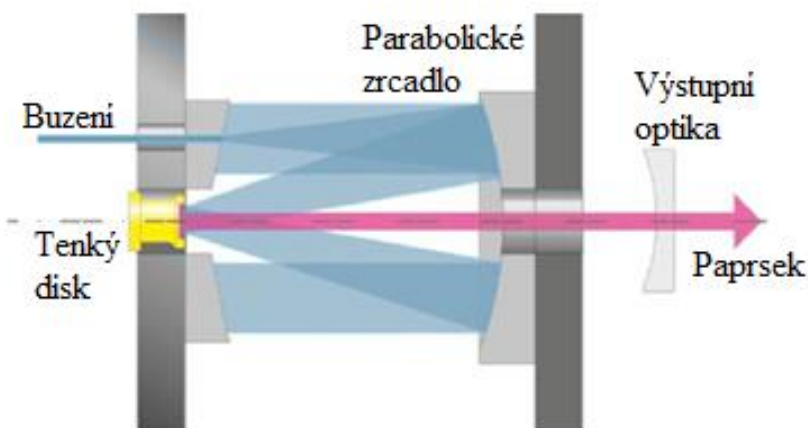


Obr. 13 Boční buzení [29].



Obr. 14 Zadní buzení [29].

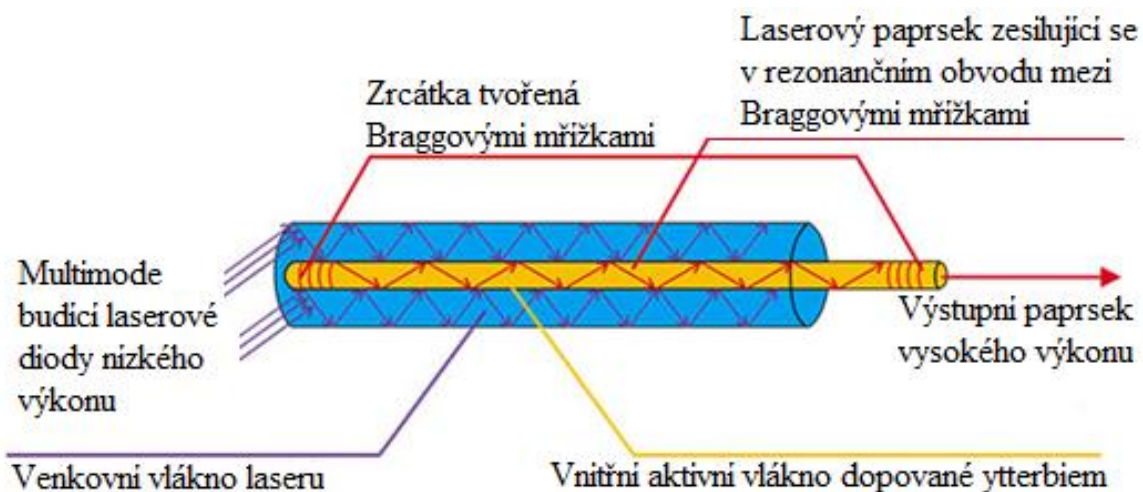
Princip diskového laseru (obr. 15) je obdobný jako u Nd:YAG laseru, ale rozdíl spočívá v geometrii aktivního prostředí. Aktivním prostředím u diskového laseru je nejčastěji tenký disk z Yb:YAG krystalu, který je čerpán na velké ploše shora a chlazen zdola. Chlazená čelní plocha obsahuje dielektrický povlak, který odráží záření generované buzením a laserové záření. Paprsek z budícího zařízení je směřován k parabolickému zrcadlu a je odražen zpět k tenkému disku, kde dojde k odražení paprsku od zadní povlakované stěny zpět k parabolickému zrcadlu. Tento proces se opakuje, dokud paprsek neopustí rezonátor. V porovnání s Nd:YAG laserem výhodou u diskového typu je rovný teplotní profil po celém disku (obr. 11), který umožňuje dosáhnout vysokého výkonu s velmi kvalitním výstupním svazkem, což je problémové v případě Nd:YAG laserů. Odvádění tepla u Nd:YAG laserů probíhá válcovým povrchem, který je kolmý k ose laserového paprsku, kdežto u diskových laserů odvod vzniklého tepla je rovnoběžný s osou laserového paprsku převážně přes jednu koncovou plochu. Diskové lasery se využívají zejména pro operace vyžadující vysoký výkon, což je například svařování a řezání kovů. Účinnost (15–20 %) a životnost (35 000 hodin) diskových laserů při porovnání s vláknovými lasery je nižší. [29; 32; 34; 35; 36]



Obr. 15 Schéma diskového laseru [36].

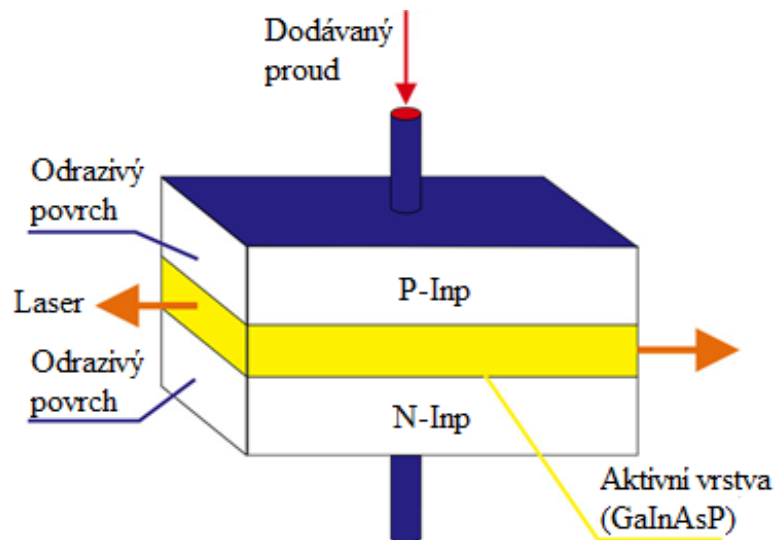
Technologicky nejmodernějším typem pevnolátkového laseru je vláknový laser. Aktivní prostředí je umístěno v tenkém jádru optického vlákna (obr. 16), které je dopované nejčastěji yterbiem. Jádro je obklopeno širším jádrem, kudy probíhá budící svazek. Buzení je zde zajištěno pomocí laserových diod, jejichž záření je vedeno přes optickou spojku do aktivního vlákna. Aktivní vlákno nevyužívá zrcadla, jak tomu bylo například u přechodících typů laserů, ale využívá Braggovské mřížky, což jsou struktury vytvořené přímo na optickém vlákne. Záření je posléze vyváděno pomocí optického kolimátoru. Teplo generované v optickém vlákne je

odváděno jeho velkou plochou, jelikož zde nedochází k velkým ztrátám, a proto není nutné žádné aktivní chlazení. Vláknové lasery se používají v kontinuálním, pulsním nebo kvazipulsním pracovním režimu. Oblast využití tohoto typu laseru je poměrně rozsáhlá a využívá se například pro řezání, svařování, značení, gravírování a mikroobrábění. Výhodou tohoto laseru je jeho jednoduchost, robustnost a modularita. Je možné dosahovat vysokých výkonů, jelikož laser je tvořen laserovými moduly jejichž spojováním se může postupně zvyšovat výkon. Mezi další výhody se řadí vysoká účinnost (30–35 %), životnost (až 100 000 hodin), malé prostorové nároky a výborná kvalita výstupního svazku, která umožňuje zaostření do velmi malého bodu. V porovnání s ostatními typy laserů, které byly zmíněny, vláknový laser má nejnižší provozní náklady a nároky na údržbu jsou téměř nulové. [29; 32; 37]



Obr. 16 Princip aktivního vlákna [37].

V případě polovodičových laserů (obr. 17) je aktivní prostředí tvořeno polovodičovým materiálem, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, jenž představují volné nosiče náboje, které je možné injektovat. Jako médium se používá GaAs (galium arsenid), CdS (kadmium sulfid) a CdSe (kadmium selen). Buzení se zde zajišťuje pomocí fotonů, svazkem elektronů, nebo elektrickým polem. Rezonátor je tvořen přesně vybroušenými stranami polovodičového materiálu a v případě průchodu elektrického proudu polovodičovým přechodem PN se může část elektrické energie přeměnit na světlo a jeho odrazem od odrazivých ploch polovodičů a mnohonásobným přechodem oblasti přechodu vznikne laserové záření. Vlnová délka generovaného záření se odvíjí od použitého polovodiče, což umožňuje spektrální přeladění v širokém pásmu, a pohybuje se v rozmezí 0,3 μm až 30 μm . Mezi další výhody se řadí jejich kompaktnost a vysoká účinnost, která může dosahovat až 50 %. V opačném případě nevýhodou těchto laserů je velká rozbíhavost svazku, což znemožňuje fokusovat svazek do malého bodu. Využití těchto typů laserů v průmyslu je převážně v oblasti povrchových aplikací jako je svařování, navařování, kalení a nanášení vrstev. [15; 38; 39; 40]



Obr. 17 Schéma polovodičového laseru [38].

Kapalinové lasery

Aktivní prostředí kapalinových laserů je tvořeno roztoky organických barviv nebo speciálně připravených kapalin dopovaných ionty vzácných zemin. Využívány jsou různá barviva tvořící aktivní prostředí jako například Rhodamin 6G, Rhodamin B, Fluorescein a Alizarin rozpuštěné například v lihu, nebo destilované vodě. Pro buzení se často využívá záření z jiného laseru, nebo je také využíváno záření z výbojky. V případě buzení výbojkou je využit rezonátor stejně jako u pevnolátkových laserů. [15; 28; 30; 38]

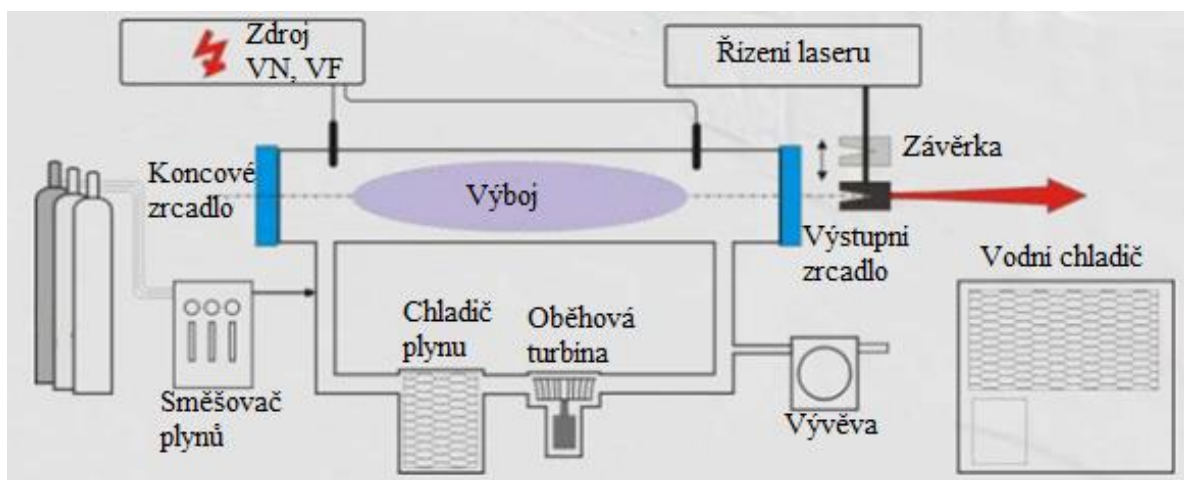
Hlavní předností kapalinových laserů je možnost nastavení a plynulá změna vlnové délky. Spektrum vyzářeného světla přímo ovlivňuje zvolené barvivo, kde například Polymethinová barviva generují záření červené až infračervené (700–1 500 nm), xanthenová barviva generují ve viditelném spektru (400–500 nm) a scintilátorová barviva generují záření v ultrafialové oblasti spektra (< 400 nm). K přeladění, a tedy ke změně vlnové délky je možné využít difrakční mřížku, která se umístí do rezonátoru a jejím natáčením dojde ke změně vlnové délky výsledného světla. Použití difrakční mřížky není jediný způsob, jak lze měnit vlnovou délku a využívá se také způsobu rozložení výstupního paprsku laseru například hranolem a následně je použita jen požadovaná část spektra. Tento typ laseru není v průmyslové oblasti příliš rozšířen, a to z důvodu krátké životnosti aktivního prostředí, které se v důsledku tepla a světla rozkládá. [15; 28; 30; 38]

Plynové lasery

Aktivní prostředí u plynových laserů je tvořené plynem nebo směsí plynů. Mezi plyny, které se využívají se řadí helium, neon, argon, oxid uhličitý nebo směs těchto plynů. Podle použitého plynu nebo směsi plynů se rozlišují různé typy plynových laserů a charakteristika laserového výstupu. Aktivní prostředí je umístěno v dutině rezonátoru, který se skládá ze dvou zrcadel umístěných na koncích. Jedno zrcadlo je plně reflexní, kdežto druhé jen částečně a umožňuje částečný vstup paprsku. Buzení zajišťující dodání energie do aktivního prostředí a tím vytvoření inverzní populace se zajišťuje pomocí elektrického výboje, světla výbojky, radiofrekvenčních vln nebo opticky, ale tento způsob se používá jen zřídka. Tyto lasery pracují v širokém rozsahu vlnových délek v kontinuálním nebo pulzním režimu. K nejrozšířenějším typům plynových laserů se řadí helium – neonový laser, argonový laser, helium – kadmiový laser a CO₂ laser, který je v průmyslu nejvíce používaný. Zvláštním typem plynových laserů jsou lasery excimerové, které jsou výkonným zdrojem ultrafialového záření. Plynové lasery se vyznačují několika výhodami, oproti jiným typům laserů, které například jsou [28; 30; 41]:

- Možnost velkého objemu aktivního média, což umožňuje vysokou koncentraci excitovaných atomů nebo molekul. Zvětšující se objem přispívá ke zvýšení výkonu a účinnosti.
- Plyny tvořící aktivní prostředí jsou obvykle levné a snadno dostupné. Na základě toho jsou plynové lasery z hlediska materiálů potřebných pro jejich provoz nákladově efektivní.
- Poměrně účinný mechanismus odvodu tepla. Vzniklé teplo je možné snadno odvádět pomocí chladicích systémů, což pomáhá udržovat stabilní výkon a prodlužuje životnost laseru.

CO₂ lasery (obr. 18) se řadí díky svým výkonovým možnostem k nejpoužívanějším laserům pro řezání a svařování. Tyto lasery jsou schopné pracovat v kontinuálním i pulzním režimu s nízkou módovou strukturou svazku. Typický výkon těchto laserů je v rozmezí 500 W až 5 000 W, ale jsou schopné dosahovat i výkonu do 20 kW. Aktivní prostředí umístěno v rezonátoru tvoří směs plynů CO₂, N₂, He a případně i další přídavné plyny. Rezonátor je tvořen dvěma zrcadly umístěnými na koncích nebo více zrcadly, čímž dojde ke zkrácení délky rezonátoru. Buzení aktivního prostředí se zajišťuje pomocí stejnosměrného proudu, střídavého proudu nebo radio frekvenčními vlnami a účinnost přeměny energie se pohybuje kolem 10 % až 20 %. CO₂ lasery generují obvykle infračervené záření o vlnové délce 10,6 μm, ale je možné dosahovat i jiných hodnot vlnové délky výstupního záření. [31; 42]



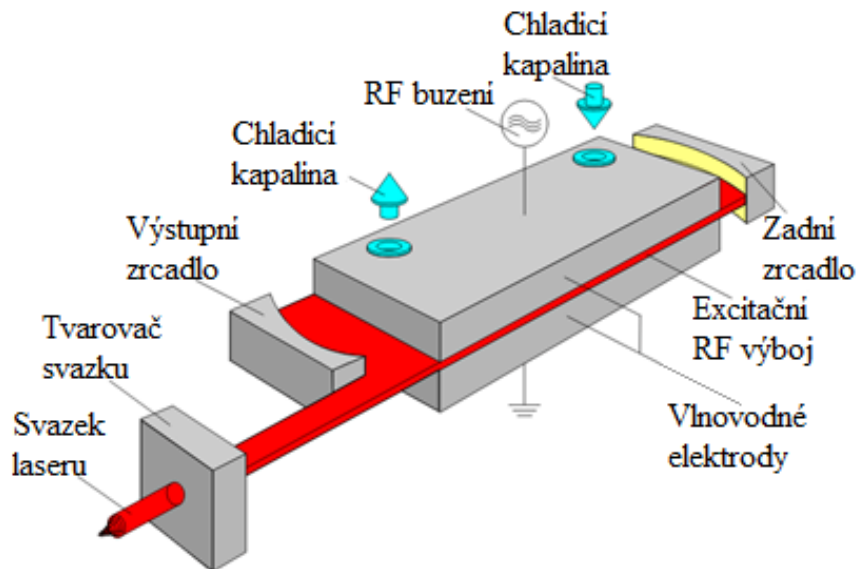
Obr. 18 Schéma CO₂ laseru [27].

V porovnání s pevnolátkovými lasery (zejména Nd:YAG a vláknový laser), které pracují s výstupním svazkem o kratší vlnové délce, mají výhodu v účinnější absorpci v kovovém materiálu a ve snadnějším přenosu paprsku z důvodu možnosti použití optického vlákna. Absorpce paprsků CO₂ je tedy méně příznivá, ale z hlediska nákladů se jeví jako výhodné řešení. Svazek u CO₂ laserů nemůže být veden optickým vláknem a pro vedení se musejí používat zrcadla, což je značná nevýhoda, jelikož dráha je složitější, jsou nutné její pravidelné kalibrace, větší nároky na čistotu a údržbu zrcadel. CO₂ lasery je možné rozdělit podle konstrukce rezonátoru, systému proudění plynu a buzení aktivního prostředí na několik typů [29; 31; 42]:

- **CO₂ lasery s pomalým axiálním prouděním** plynů rezonátorem jsou buzeny prostřednictvím stejnosměrného nebo střídavého elektrického výboje. Výboj má směr shodný s osou rezonátoru i vystupujícího svazku. U tohoto typu se dosahuje stabilního výstupního výkonu (do 1 000 W) s dobrou módovou charakteristikou svazku, což umožňuje vytvářet hladké řezy. Pracovní režim může být kontinuální i pulzní.
- **CO₂ lasery s rychlým axiálním prouděním** plynů představují typ, kde přebytečné teplo je odváděno rychle proudícím plynem, který prochází externím chladičem, než se

znovu vrátí do dutiny rezonátoru. Potřebná regenerace plynu je zajišťována taktéž mimo dutinu rezonátoru. Módová struktura svazku je poměrně dobrá, ale často dochází k rychlým fluktuacím módu, což může způsobovat zhoršení kvality řezu. Výkon u tohoto typu se běžně pohybuje v rozmezí 500 W až 5 000 W a lasery mohou pracovat v pulzním nebo kontinuálním režimu. Buzení aktivního prostředí může být zajištěno stejnosměrným nebo střídavým elektrickým výbojem.

- V případě **CO₂ laserů s příčným prouděním** laserový svazek, proudění plynu a elektrický výboj jsou ve třech různých směrech. Výboj je těžko ovladatelný a tento typ laseru nemůže pracovat v pulzním režimu. Módová struktura svazku pro řezání je horší v porovnání s ostatními typy CO₂ laserů, a proto se tyto lasery především používají pro svařování a tepelné zpracování. Používaný výkon se pohybuje v rozmezí 1 kW až 20 kW. K buzení aktivního prostředí se běžně využívá stejnosměrný elektrický výboj.
- **Slab lasery** (obr. 19) představují typ, kde plyn je umístěn mezi dvěma elektrodami, které budí aktivní prostředí rádio frekvenčním vlněním. Tyto elektrody jsou chlazené vodou a díky své velké ploše zároveň slouží k difuznímu chlazení plynu v rezonátoru. Výkon tohoto typu laseru se pohybuje do 5 kW. Předností tohoto typu je vysoká spolehlivost, dlouhá životnost a nízké provozní náklady.



Obr. 19 Schéma slab laseru [29].

3.2 Rozdělení podle typu excitace a režimu provozu

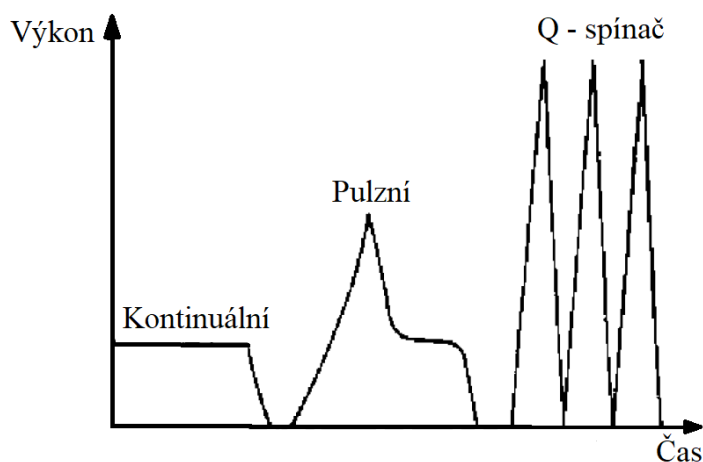
Výrazy jako excitace, buzení nebo čerpání představují stejný význam a jedná se o působení na aktivní prostředí, které má za následek emisi fotonů. Toho je možné dosáhnout několika způsoby jako například opticky, elektricky, chemicky, elektronovým svazkem, expanzí horkého plynu a dalšími. V každém případě se jedná o přivedení energie, jen se liší formou, množstvím nebo dobou působení. Způsob buzení se volí na základě laserového média. Popsány budou jen nejběžnější způsoby buzení, mezi které se řadí optické, elektrické a chemické buzení [28; 38; 43]:

- **Optické buzení** dodává energii aktivnímu prostředí formou světelného záblesku. Zdrojem světelného záblesku může být vysokotlaká výbojka nebo blok laserových diod napájených vysokým proudem. Tento způsob buzení může být popsán na rubínovém laseru, kde rubínová tyčinka je vložena do spirálové výbojky. Záblesk výbojky způsobí přechod atomů na vyšší energetickou hladinu a při návratu atomů do základního stavu

se část energie vyzáří ve formě laserového paprsku. Tento typ buzení se uplatňuje především u pevnolátkových a kapalinových laserů.

- V případě buzení pomocí **elektrického pole** je základem celého procesu elektrický výboj, ke kterému dochází v plynové náplni laseru. Tento způsob buzení se používá zejména u plynových laserů.
- **Chemické buzení** dodává energii aktivnímu prostředí prostřednictvím energie exotermických chemických reakcí. První typ laseru využívající chemického buzení využíval reakce vodíku s chlorem. Později se využívala reakce vodíku s fluorem. Jiné typy laseru mohou získávat energii například ze štěpení molekul jódu ultrafialovým zářením.

Lasery je možné dále rozdělit z hlediska režimu fungování (obr. 20) na kontinuální a pulzní. Kontinuální lasery generují paprsek o souvislém výstupním výkonu a využívají se zejména v oblasti řezání a kalení. V opačném případě pulzní lasery, jak vypovídá jejich název, generují pulzy. Pulzní lasery se dále dělí podle typu, jakým je pulz generován. V průmyslu je nejčastěji používán Q-spínač, což umožňuje laserům generovat pulzy s délkou v řádu nanosekund. Další používanou možností pro generování pulzů je pomocí pulzního buzení například výbojkami, které generují pulzy s délkou v řádech milisekund. Speciální typ představují ultra rychlé lasery, jež generují pulzy v řádech pikosekund a femtosekund. Tento typ laseru je vhodný pro mikroobráběcí aplikace, ale v průmyslu zatím není příliš rozšířen z důvodu jeho vysoké pořizovací ceny. [1; 32; 44]



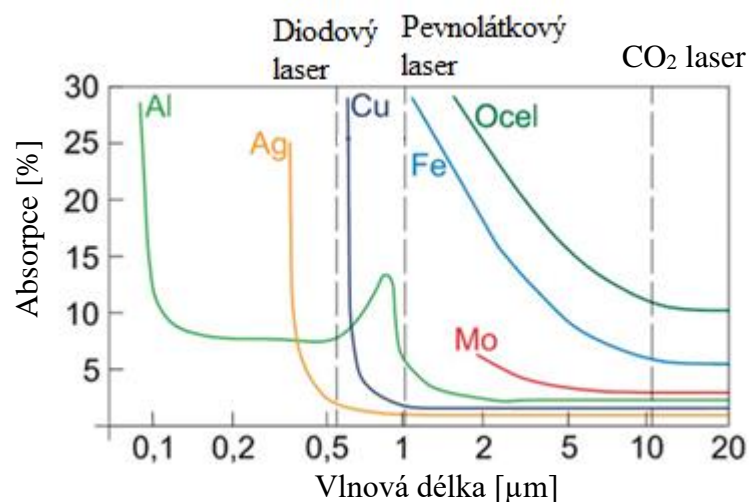
Obr. 20 Pracovní režimy laserů [45].

3.3 Rozbor materiálů řezaných laserem

V průmyslové oblasti se pro zpracování materiálů využívá celá řada typů jednotlivých laserů, jako například CO₂ laser a jiné typy laserů, které byly popsány v předešlých kapitolách. Každý typ laseru se vyznačuje svými výhodami, nevýhodami a omezeními. Volba správného laseru spočívá na konkrétních požadavcích na řezání a zpracovávaném materiálu. Jednotlivé materiály mají různou absorpci záření pro různé hodnoty vlnové délky, a z tohoto důvodu je důležitá volba správného laseru, aby bylo dosaženo požadovaných výsledků při řezání. Na obrázku 21 je znázorněna závislost absorpce záření různých materiálů na vlnové délce záření. S materiály se pojí několik vlastností, které ovlivňují účinnost, přesnost a celkovou úspěšnost procesu řezání. Mezi tyto vlastnosti se řadí [3; 11; 20; 45]:

- Stabilita materiálu, jelikož některé materiály mohou během procesu řezání laserem vykazovat nepředvídatelné chování. Takové chování materiálu může mít za následek různou kvalitu řezu.

- Absorpce se řadí mezi jednu z nejdůležitějších vlastností a představuje schopnost materiálu pohlcovat laserové záření. Tato vlastnost ovlivňuje, kolik laserové energie je materiál schopný absorbovat.
- Tloušťka řezaného materiálu má vliv na potřebný výkon laseru a rychlost řezání. S rostoucí tloušťkou materiálu může být požadován vyšší výkon a nižší řezná rychlost.
- Odrazivost materiálu neboli reflexivita ovlivňuje interakci laserového paprsku s materiálem. Vysoce reflexní materiály jako jsou například měď, stříbro, hliník a jiné budou většinu energie z laserového paprsku dopadajícího na povrch materiálu odrážet. Následkem tohoto jevu jsou špatné výsledky řezání nebo také poškození stroje.
- Dalším důležitým faktorem je teplota tání materiálu, což udává, při jaké teplotě látka pevného skupenství přejde do skupenství kapalného. Materiály jejichž teplota tání je vyšší jsou obecně vhodnější pro řezání laserem.
- Tepelnou vodivostí materiálu je ovlivňován odvod tepla během procesu řezání. Materiály s vysokou tepelnou vodivostí, mezi které se řadí například měď, odvádějí teplo rychle, a tudíž je nutné zajistit vyšší výkon laseru pro efektivní řezání.
- Povrch materiálu také ovlivňuje výslednou kvalitu řezu. Obecně čisté a hladké povrchy vykazují lepší výsledky řezání v porovnání s drsnými a znečištěnými povrchy, které mohou způsobovat nekonzistentní řezy a potřebu dalších operací, aby bylo dosaženo požadovaného výsledku.
- V některých případech mohou materiály negativně reagovat na teplo vzniklé během řezání a může dojít k chemické změně nebo také ke změně barvy.
- Mezi další parametr ovlivňující laserové řezání se řadí složení materiálu, zahrnující jeho chemické složení a přísadové prvky.
- Průhlednost, mezi běžné průhledné materiály se řadí například sklo a některé plasty. Účinnost absorpce laserové energie u průhledných materiálů není tak vysoká jako je tomu v případě kovu nebo jiných neprůhledných materiálů. Průhlednost tedy může vést ke špatným výsledkům řezání.
- Reakce materiálu na použitý plyn při řezání, jelikož materiály reagují odlišně na kyslík, dusík a jiné použité plyny a tento faktor může ovlivnit kvalitu a proces řezání.
- Dále má také vliv na proces řezání struktura materiálu, jelikož krystalické a amorfí struktury se mohou lišit v absorpci energie a tepelné vodivosti.



Obr. 21 Závislost absorpce záření různých materiálů na vlnové délce záření [26].

Řezání kovových materiálů

Kovy se obecně rozdělují do dvou skupin na železné a neželezné. Mezi železné kovy se řadí ocel a litina. Neželezné kovy se dále rozdělují podle různých hledisek, ale nejpoužívanější rozdělení je podle hustoty. Z hlediska použití určitého typu laseru pro řezání kovových materiálů jsou vhodné CO₂ lasery s výkonem 1 až 8 kW a lasery pevnolátkové o výkonu 0,5 až 4 kW. U dělení ocelových materiálů se rozlišuje druh oceli (měkká, nízkolegovaná, legovaná, korozivzdorná a jiné), předešlé zpracování (plechy válcované za tepla a za studena) a dodatečné úpravy (tryskané povrchy plechů, povrchově upravené plechy, pozinkované a jiné), které je nutné zohlednit při použití laseru. [20; 45; 46]

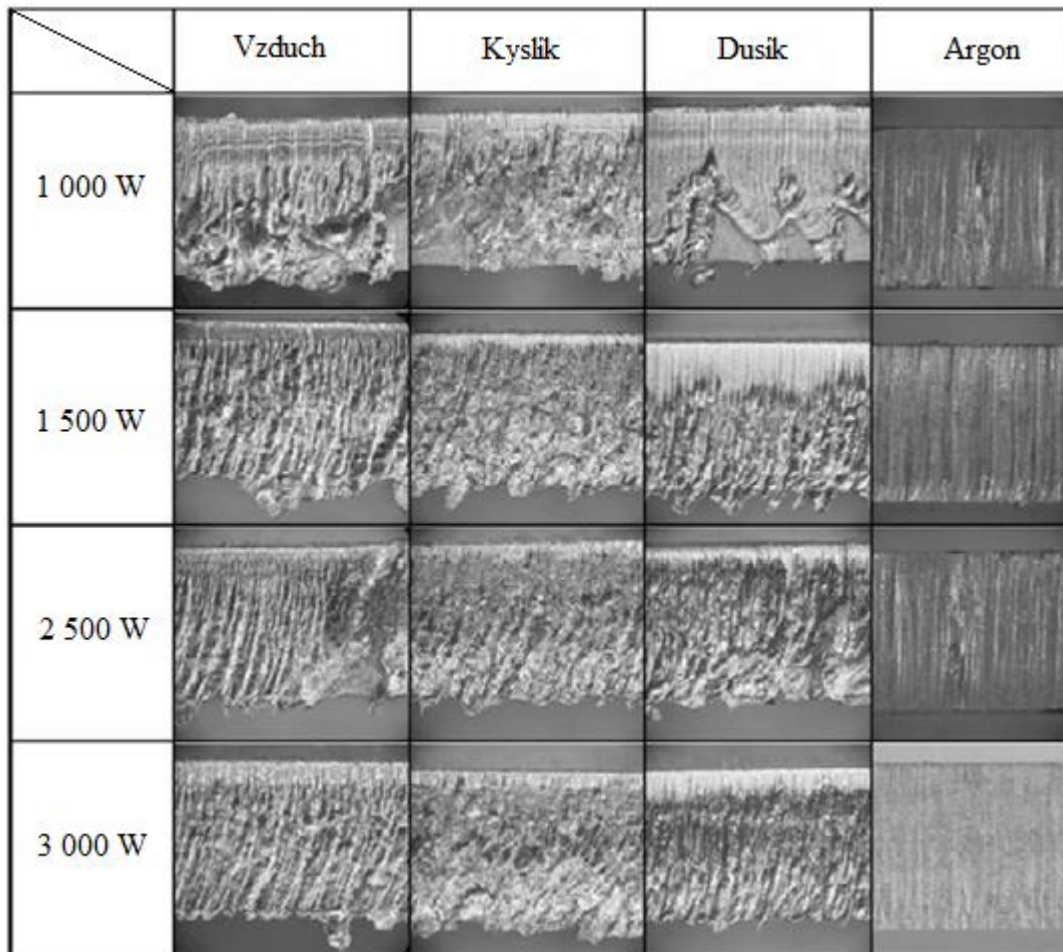
Stav povrchu po předcházející operaci ovlivní laserové řezání stejně jako zbytky maziva, kontaminované produkty, korozní zplodiny a tvrdá oxidická vrstva. Oxidická vrstva způsobuje zpomalení rychlosti řezu a zhoršuje jeho kvalitu, jelikož dochází k tvoření otřepů, což jsou ztuhnuté kapky materiálu ve spodní části řezu. V případě řezání pozinkovaných plechů dochází k natavení a odpaření zinku v místě řezu a tvoření otřepů ve spodní části řezu. Dále u řezání pozinkovaných plechů musí být zajištěno dostatečné odsávání, jelikož výpary zinku jsou zdraví škodlivé. Tryskané plechy obecně vykazují horší kvalitu řezu, která je způsobena usazenými tvrdými částicemi v roztaveném materiálu. [45]

Mezi další materiály, jež jsou běžně řezány pomocí laseru se řadí korozivzdorné oceli. U těchto ocelí je nutné řezat v závislosti na obsahu chromu (chrom má silný sklon k tvorbě oxidické vrstvy) až o 40 % pomaleji než nízkolegované oceli. Nevýhodou řezání korozivzdorných ocelí je těžší odstraňování taveniny z řezu, jelikož oxid chromu brání úniku taveniny, která poté zůstává ve formě otřepů na spodní straně řezu. Z hlediska tloušťky řezu se u korozivzdorných materiálů při stejném výkonu dosahuje nižší tloušťky v porovnání s dosaženou tloušťkou u nízkolegovaných materiálů. Nízkolegované oceli jsou řezány velmi účinně z důvodu dobré exotermické reakce železa, která tvoří nízkoviskózní lehce odstranitelný oxid železa. [45]

Proces laserového řezání neželezných kovů, mezi které se například řadí hliník, titan, nikl a měď není tak efektivní jako je tomu u ocelí. Tyto kovy vykazují vyšší tepelnou vodivost, reflexivitu a nižší účinnost oxidické reakce, což způsobuje nižší rychlost řezání v porovnání s ocelemi. Dále tyto kovy jsou charakteristické tvorbou otřepů a silným sklonem k oxidaci. Kovy, které nejsou silně reaktivní s kyslíkem jako je nikl se doporučují také řezat s použitím argonu jako přídavným plynem, jelikož argon se řadí mezi inertní plyny. [45]

Titan jako jediný z neželezných kovů reaguje podobně jako ocel a může být řezán s podobnou účinností. Při řezání titanu se doporučuje použít argon jako přídavný plyn, jelikož zajistí, aby hrana řezu zůstala nezoxidovaná, protože titan je náchylný na tvorbu výrazné oxidické vrstvy. Pokud hrana řezu má žlutou nebo modrou bravu, svědčí to o přítomnosti oxidické vrstvy. Pro dosažení kvalitní řezné hrany bez vzniku otřepů u titanu je nutné řezat s vysokým tlakem plynu v rozmezí 0,3 až 1 MPa. [45]

V případě hliníku, jenž se řadí mezi obtížněji řezatelné materiály pomocí laseru z důvodu vysoké reflexivity, se doporučuje řezat až po vytvoření anodické vrstvy, která umožňuje řezání s vyšší rychlostí. Na obrázku 22 je možné vidět řezné hrany hliníku při různých výkonech a použitých plynech, které byly zhotoveny při použití vláknového laseru. Jak je vidět na obrázku nejlepších výsledků se dosáhlo při použití argonu. Argon je zároveň také nejdražší z používaných plynů, a proto se v praxi často používá dusík, který disponuje multifunkčním použitím (použití i u jiných kovů) a nižšími náklady. [45; 47]



Obr. 22 Hrany řezu hliníku při různých výkonech a použitých plynech [47].

Řezání nekovových materiálů

Materiály, jejichž základem není některý z kovů, se řadí do skupiny nekovových materiálů. Mezi nekovové materiály se řadí například keramika, plasty, kompozitní materiály, dřevo a další. V oblasti řezání nekovových materiálů se CO₂ laser jeví jako nejvhodnější volba z důvodu výsledné přesnosti a všestrannosti při řezání široké škály nekovových materiálů. Vlnová délka záření vláknových laserů není téměř pohlcována těmito materiály, a proto není jejich použití v tomto případě příliš vhodné. Řezný proces nekovů zahrnuje tři základní mechanismy [11; 20; 45; 46]:

- Dělení tavením a následným stříhem, což je velmi rychlý způsob řezání s kvalitní výslednou řeznou hranou. Tento mechanismus je typický pro termoplasty a keramické materiály.
- Natavením a následným odpařením materiálu ze zóny řezu. Dojde ke vzniku vysoce kvalitní řezné spáry a plochy řezu, která je hladká. Tento mechanismus řezání je typický pro plexisklo, polyacetát a akryl.
- Chemickou degradací, která vzniká na základě vlivu vysoké teploty a nerovnorodém složení materiálu. Některé fáze materiálu procházejí chemickými změnami. Díky laserové energii dochází k lámání chemických vazeb a integrity materiálu. Vzniklé hrany po řezání jsou rovné a výsledný povrch řezu je hladký, ale pokrytý jemnou vrstvou zbytkového uhlíkového prachu. Tento mechanismus je typický pro materiály na bázi dřeva, kompozitní materiály a některé plasty (polyvinylchlorid, polyuretan).

V případě dělení kompozitních materiálů se výkon doporučuje volit na základě vlastností použitých vláken, a ne dle vlastností matrice. Vysoký výkon nutný pro řezání vláken zapříčiní

chemickou degradaci především polymerové matrice. Matrice a vlákna se liší teplotou odpařování, a tedy i dobou, za kterou dojde k natavení materiálu. Tepelná vodivost kompozitních materiálů je anizotropní. Pro řezání se doporučuje využít Nd:YAG a excimerové lasery oproti CO₂ laserům, které vykazují větší tepelně ovlivněnou oblast. [45]

4 TECHNOLOGICKÉ VYBAVENÍ FIRMY

Zaměření této kapitoly je především na firmu VOP GROUP, s.r.o. její technologické vybavení, manipulaci s materiálem, a především na využívané laserové stroje v oblasti strojírenské výroby. Společnost sídlí ve městě Český Těšín a zaměřuje se na podnikání v širokém spektru činností. Prioritními činnostmi v minulém období byly obory strojírenství, elektrotechnika a elektronika, které byly orientovány zejména na pokrytí potřeb majoritního odběratele, kterým byla armáda České republiky. Společnost se neustále snaží pronikat na trh s civilní výrobou na základě zakázkové strojírenské výroby a zakázkové výroby nábytku.

Přehled technologických zařízení určených pro strojírenskou výrobu:

- laserové stroje – TruLaser 3030, DURMA HD-F 3015BH,
- ohraňovací lis – AMADA HFT-100-3,
- CNC obráběcí centrum – TAKAMAZ X-150PLUS,
- horizontální soustruh – DOOSAN LYNX,
- obráběcí centrum – DOOSAN DNM 500,
- ohýbačka – WB 10-A,
- CNC ohýbačka trubek – CNC38BR2,
- lemovačka plechu – XBC 400,
- kotoučová pila – TAC 75,
- robotizované svařovací pracoviště – OTC DAIHEN,
- tryskací zařízení – Wista,
- tryskací kabina – DUKE 9080 F-A,
- lakovací kabiny – Mecnan Tenax 80DD, WISTA-SAVIM,
- válcovačka závitů.

4.1 Laserové stroje a ohraňovací lis využívané firmou

Laser TruLaser 3030

Jedná se o robustní a spolehlivý CO₂ laser od společnosti TRUMPF, který slouží k přesnému řezání plechů. CO₂ lasery TruFlow (obr. 23) od společnosti TRUMPF se v průmyslové oblasti využívají řadu let. Rezonátor o čtvercové konstrukci je mechanicky robustní a teplotně odolný. Výkon těchto laserů zůstává zachován mnoho let díky minimálnímu opotřebení. Výsledné řezné hrany jsou hladké a ve většině případů není potřeba žádných dokončovacích operací. Díly jsou také i bez mikrotrhů a to i například u dílů ze silné korozivzdorné oceli. Technické údaje tohoto laseru je možné vidět v tabulce 2. [48; 49]

Tab. 2 Technické údaje laseru TruLaser 3030 [48].

Rozměry	Délka	9 300 mm
	Šířka	4 600 mm
	Výška	2 000 mm
Rychlosti	Paralelně s osou	60 m·min ⁻¹
	Simultánně (X a Y)	85 m·min ⁻¹
Maximální hmotnost obrobku	710 kg	
Maximální výkon laseru	3 200 W	
Pracovní rozsah	Osa X	3 000 mm
	Osa Y	1 500 mm
	Osa Z	115 mm
Specifická data laseru	Max. tloušťka plechu, konstrukční ocel	20 mm
	Max. tloušťka plechu, korozivzdorná ocel	12 mm
	Max. tloušťka plechu, hliník	8 mm



Obr. 23 TruLaser 3030 [50].

Laser DURMA HD-F 3015BH

Jedná se o vláknový laser DURMA (obr. 24) v typové řadě „HDF“, který představuje vysokorychlostní 2D laserový systém pro řezání plechů. Tento typ laseru je především určen pro efektivní, rychlé a kvalitní pálení zejména oceli, korozivzdorné oceli, mědi, hliníku a mosazi. Dále je tento stroj vybaven příslušenstvím pro řezání trubek a jiných profilů. Stroj využívá letmé optiky, což znamená že plech určený k řezání je uložen na souřadnicovém stole

a laserová hlava se pohybuje ve směrech os X, Y a Z. Technické údaje laseru a řezné kapacity je možné vidět v tabulce 3 a 4. [51]

Tab. 3 Technické údaje laseru DURMA HD-F 3015BH [51].

Pracovní rozsah	Osa X	3 100 mm
	Osa Y	1 530 mm
	Osa Z	160 mm
Maximální hmotnost obrobku	1 000 kg	
Rychlosti	Rychlost v ose X	120 m·min ⁻¹
	Rychlost v ose Y	120 m·min ⁻¹
	Simultánní rychlost	141 m·min ⁻¹

Tab. 4 Řezné kapacity [51].

Výkon	1 kW	2 kW	3 kW	4 kW	6 kW	8 kW	10 kW	12 kW	15 kW
Ocel [mm]	8	12	16	20	25	25	30	35	35
Korozivzdorná ocel [mm]	4	6	8	10	15	20	25	30	35
Hliník [mm]	4	6	8	12	20	25	25	30	35
Měď [mm]	2	3	5	6	10	12	15	15	15
Mosaz [mm]	4	6	8	10	12	15	20	20	20



Obr. 24 DURMA HD-F 3015BH [52].

Ohraňovací lis AMADA HFT-100-3

Ohraňovací lis AMADA HFT-100-3 (obr. 25) představuje spolehlivé a efektivní řešení pro přesné ohýbání a tváření kovů. Stroj je vhodný pro aplikace v kovovýrobě, které vyžadují vysokou přesnost, produktivitu a všestrannost, jelikož disponuje pokročilým CNC/NC řízením, robustní konstrukcí a bezpečnostními prvky. Díky CNC/NC ovládacím prvkům je možné zajistit

přesnou kontrolu nad ohýbáním, což umožňuje přesné polohování a opakovatelnost procesu. Stroj disponuje také systémem zadního dorazu, který zajišťuje přesné polohování plechu a může být nastaven automaticky pomocí CNC ovládacích prvků. Intuitivní rozhraní stroje umožňuje obsluhu snadno programovat a upravovat parametry ohýbání, jako je úhel ohybu, poloha zadního dorazu a rychlost ohýbání. Technické údaje ohraňovacího lisu je možné vidět v tabulce 5. [53]

Tab. 5 Technické specifikace ohraňovacího lisu AMADA HFT-100-3 [53].

Rozměry	Délka	4 070 mm
	Šířka	2 010 mm
	Výška	3 000 mm
Hmotnost	7 300 kg	
Lisovací síla	1 000 kN	
Maximální délka ohybu	3 000 mm	
Délka zdvihu	200 mm	
Otevřená výška	470 mm	
Hloubka hrdla	420 mm	
Počet řízených os	4	
Rychlosti	Rychlost přiblížení	100 mm·s ⁻¹
	Rychlost ohýbání	10 mm·s ⁻¹
	Rychlost návratu	100 mm·s ⁻¹



Obr. 25 AMADA HFT-100-3 [53].

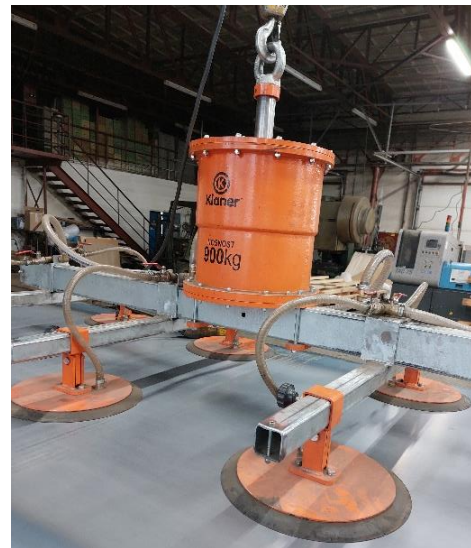
4.2 Manipulace s materiálem

Manipulace materiálu, a tedy nakládání plechu určenému k řezání nebo odebrání již zbytkové plechové mříže po procesu řezání z výměníku palet laserového stroje je zajištěna, u obou laserových strojů, jimiž firma disponuje, pomocí jeřábů opatřenými kladkostroji, na nichž jsou

zavěšeny vakuové samopřísavné manipulátory. Vakuové samopřísavné manipulátory (obr. 26) se využívají pro přemísťování plochých materiálů s neprodyšnými povrchy, kde podtlak se vytváří samočinně zvedáním manipulátoru za jeho píst. Tyto manipulátory se skládají ze základní jednotky, na kterou je namontována traverza s přísavkami. Před samotnou manipulací se manipulátor spustí na materiál tak, aby došlo k úplnému zasunutí pístu a uvolnění závěsného řetězu. Uvnitř dojde k otevření sacího ventilu a při následném zvedání se táhne za píst manipulátoru, čímž dojde ke vzniku potřebného podtlaku ke zvednutí břemena. Obsluha ovládá pouze jeřáb nebo kladkostroj, jelikož manipulátor je bezobslužný, ale některé typy mohou být vybaveny uzavíracími ventily, kterými může obsluha regulovat počet činných přísavek. Při odkládání materiálu dochází k zasunutí pístu a mechanismus uvnitř manipulátoru automaticky uzavře sací ventil a tím dojde k jeho uvolnění od přesouvaného materiálu. Manipulátory jsou dále vybaveny manometrem a elektrickým výstražným zařízením, které upozorňuje obsluhu při ztrátě podtlaku. Z obecného hlediska se tento typ manipulátoru vyznačuje jednoduchou a bezpečnou obsluhou, minimálními požadavky na údržbu, dlouhou životností a nízkými provozními náklady. [54; 55]



a) VMS 1200-6



b) VMS 900-6

Obr. 26 Vakuové samopřísavné manipulátory využívané firmou VOP GROUP, s.r.o.

Pro manipulaci s materiálem u laserového stroje DURMA HD-F 3015BH se využívá sloupového otočného jeřábu typu VS značky ABUS. Tento jeřáb disponuje maximální nosností 2 000 kg a vyložením ramene 5 m, na kterém je umístěn elektrický řetězový kladkostroj. Na háku kladkostroje je zavěšen vakuový samopřísavný manipulátor typu VMS 1200-6 (obr. 26 a) značky Klaner s maximální nosností 1 200 kg. [54; 56]

Manipulace s materiálem u laseru Trulaser 3030 je zajištěna pomocí konzolového jeřábu typové řady KJER-K, který disponuje maximální nosností 1 000 kg a vyložením ramene 5 m. Na rameni jeřábu je umístěn elektrický kladkostroj, na jehož háku je zavěšen vakuový samopřísavný manipulátor typu VMS 900-6 (obr. 26 b) značky Klaner. Maximální nosnost tohoto manipulátoru je 900 kg. [57]

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části této diplomové práce je zhodnocení vlivu vybraných parametrů laserového řezání na drsnost povrchu a rozměrovou přesnost výpalků z lehkých a barevných kovů. Experiment byl založen na zhotovení několika vzorků ze dvou vybraných materiálů, na kterých byl následně pozorován vliv výkonu laserového stroje, rychlosti řezání a tlaku použitého plynu na rozměrovou přesnost řezání a drsnost vzniklé hrany. V průběhu samotné výroby jednotlivých vzorků docházelo po vypálení jednoho vzorku k postupnému měnění hodnoty pouze u jednoho z parametrů při zachování konstantních hodnot u zbylých dvou parametrů. Tímto postupem bylo zhotoveno několik vzorků, u kterých se měnil pouze výkon laserového stroje, rychlost řezání a tlak použitého plynu. Řezání všech vzorků se uskutečnilo v prostorách firmy VOP GROUP, s.r.o. na laserovém stroji DURMA HD-F 3015BH, který byl popsán v kapitole 4.1.

Tato kapitola je rozdělena na dvě části, a to z důvodu použití dvou materiálů. První část je zaměřena na sledování vlivu vybraných parametrů laserového řezání na vypálených vzorcích z materiálu, který se řadí mezi lehké kovy. Druhá část této kapitoly se zabývá sledováním vlivu vybraných parametrů laserového řezání na vypálených vzorcích z materiálu, který spadá do skupiny barevných kovů.

5.1 Výběr materiálových představitelů pro experiment

V této části kapitoly jsou popsány materiály, které byly použity k výrobě vzorků, kterých bylo vyrobeno celkově 50 a tedy 25 pro každý materiál. Pro první část experimentu byly vzorky vyrobeny z materiálu, jehož označení je EN AW 5754 (ČSN 42 413, AlMg3). Tato slitina byla dodána v tloušťce 3 mm. Ve druhé části experimentu byly vzorky vyrobeny z materiálu, který nese označení Cu-ETP (CW004A, ČSN 42 3001) o tloušťce 1 mm.

EN AW 5754

Hliník EN AW 5754 (ČSN 42 413, AlMg3) spadá do řady 5 000 – slitiny s hořčíkem. Slitiny s hořčíkem vykazují zvýšenou odolnost vůči korozi a využívají se ke stavbě lodních konstrukcí, v chemickém a potravinářském průmyslu. Dále tento materiál vykazuje také dobrou svařitelnost a tvárnost za studena. Obchodní označení těchto slitin je hydronaulin a pokud obsahují i křemík, používá se označení pantal. Používá se například pro svařované konstrukce v jaderném, chemickém a potravinářském průmyslu. Dále se také používá pro tlakové nádoby, trubky, kotle, stavbu lodí a člunů. Na základě dodaného atestu (příloha 1) je možné v tabulce 6 a 7 vidět chemické složení a mechanické vlastnosti této slitiny. [58]

Tab. 6 Chemické složení slitiny EN AW 5754.

Chemické složení [hm. %]							
Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Cr	Ti	Zn
0,355	0,249	0,064	3,193	0,340	0,043	0,023	0,031

Tab. 7 Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 5754.

Mechanické vlastnosti		
R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅₀ [%]
230	151	21

Cu-ETP

Materiál CuETP (CW004A, ČSN 42 3001) se vyznačuje výbornou tepelnou a elektrickou vodivostí, dobrou mechanickou zpracovatelností a odolností proti korozi. Široké použití

nachází díky dobrým elektrickým a tepelným vlastnostem v elektrotechnice, elektronice a telekomunikacích. Dále se také používá v automobilovém a kabelovém průmyslu. Dle dodaného atestu (příloha 2) je možné vidět chemické složení a mechanické vlastnosti použitého materiálu pro experiment v tabulce 8 a 9. [59; 60; 61]

Tab. 8 Chemické složení Cu-ETP.

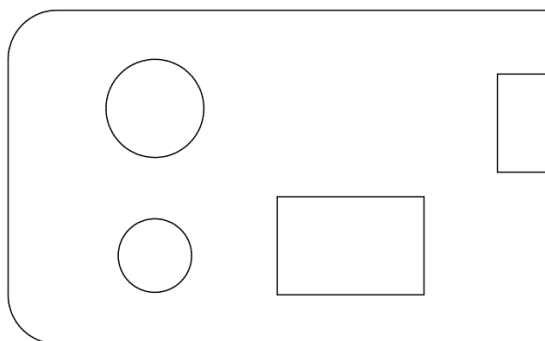
Chemické složení [%]				
Cu	O	Pb	Bi	ostatní
99,99416	0,00060	0,00023	0,00003	≤0,30

Tab. 9 Mechanické vlastnosti Cu-ETP.

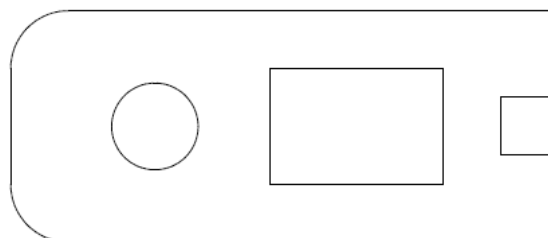
Mechanické vlastnosti		
R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅₀ [%]
247	206	36

Tvary vzorků určené pro experiment

Zvolený tvar vzorků pro řezání je pro oba typy materiálů odlišný, jelikož v druhé části experimentu, tedy v případě Cu-ETP, bylo k dispozici pro experiment méně materiálu, než tomu bylo v případě slitiny EN AW 5754. Tyto dva zvolené tvary vzorků byly konzultovány s panem doktorem Osičkou a panem inženýrem Widenkou. Vybrané tvary obsahují prvky, které jsou ve firmě VOP GROUP, s.r.o. běžně řezány na obou laserových strojích, jimiž firma disponuje. Schéma tvaru pro vzorky, které byly řezány z materiálu EN AW 5754, je možné vidět na obrázku 27, kdežto schéma tvaru pro vzorky řezané z materiálu Cu-ETP je zobrazeno na obrázku 28.



Obr. 27 Schéma tvaru pro vzorky z materiálu EN AW 5754.



Obr. 28 Schéma tvaru pro vzorky z materiálu Cu-ETP.

5.2 Měření vzorků

Tato podkapitola je zaměřena na metody testování jednotlivých vzorků, které byly vyrobeny v průběhu experimentu. U vzorků zhotovených z materiálu EN AW 5754 i vzorků vyrobených z Cu-ETP jsou měřeny stejné parametry. V případě všech vzorků je tedy testována drsnost řezné plochy a rozměrová přesnost.

Měření parametrů drsnosti

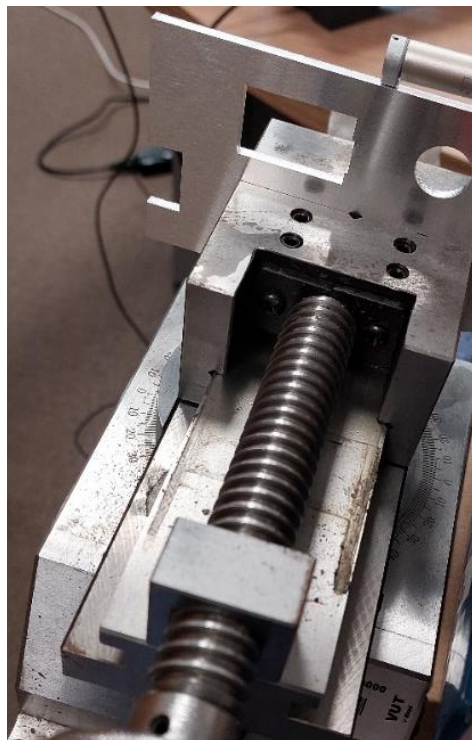
Pro měření parametrů drsnosti řezných ploch u všech vzorků byl využit profilometr Handysurf+ 35 (obr. 29) od firmy Accretech. Profilometry bývají často označovány jako drsnoměry, což není zcela správné označení. Profilometr Handysurf+ 35 představuje kontaktní přístroj, který za pomoci speciálně upraveného hrotu snímá souřadnice měřeného povrchu,

kteřé jsou poté zpracovány počítačem. Přístroj obsahuje rameno se snímacím hrotem, které se pohybuje konstantní rychlostí a snímací hrot snímá nerovnosti povrchu. V průběhu snímání je potřebná jen malá síla, která přitlačuje hrot k povrchu, čímž dojde k minimalizaci nebezpečí poškození povrchu. Podle normy ČSN EN ISO 9013, která se zabývá tepelným dělením, spadá elektrický dotykový hrotový přístroj mezi měřidla pro přesné měření. [62]

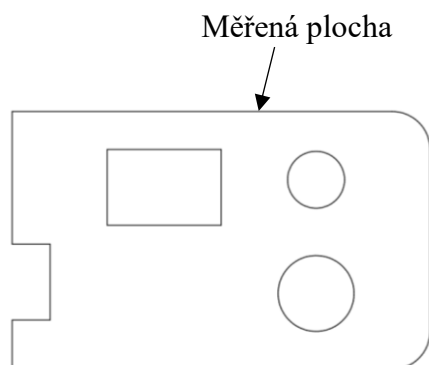


Obr. 29 Profilometr Handysurf+ 35 [63].

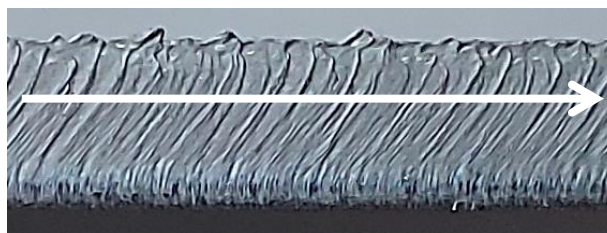
Měření jednotlivých vzorků probíhalo na Fakultě strojního inženýrství v Brně. Průběh měření drsnosti a upnutí vzorku z materiálu EN AW 5754 o tloušťce 3 mm je možné vidět na obrázku 30, kde k upnutí byl použit svěrák. Podle normy ČSN EN ISO 9013 měření probíhalo v 1/3 od horního okraje řezné hrany (obr. 32). U každého vzorku proběhlo pouze jedno měření na zvolené ploše z důvodu velkého počtu vzorků. Zvolené místo pro měření u vzorků z materiálu EN AW 5754 je zobrazeno na obrázku 31. Vyhodnocovaná délka l_n byla nastavená na 12,5 mm, na které přístroj zaznamenal pět hodnot. Zprůměrováním těchto pěti hodnot se získala výsledná hodnota zkoumaného parametru drsnosti.



Obr. 30 Průběh měření drsnosti u vzorku z EN AW 5754.

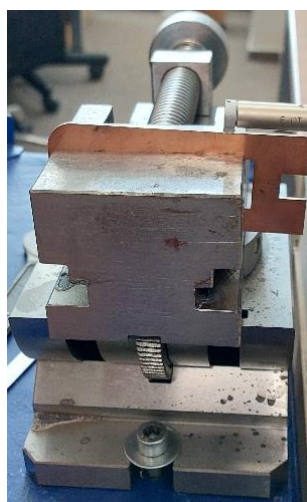


Obr. 31 Zvolená plocha pro měření drsnosti.

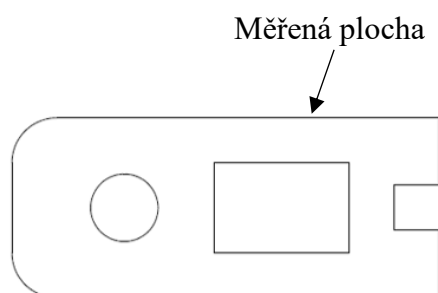


Obr. 32 Směr pohybu a umístění měřicího hrotu na testované ploše.

V případě měření drsnosti vzorků z materiálu Cu-ETP je průběh měření a upnutí vzorku zobrazeno na obrázku 33. Pro upnutí byl opět použit svěrák. Na základě normy ČSN EN ISO 9013 měření probíhalo v 1/2 řezné plochy (obr. 35), jelikož tloušťka vzorků je 1 mm. U každého vzorku z materiálu Cu-ETP proběhlo také pouze jedno měření na vybrané ploše. Vybranou plochu pro měření je možné vidět na obrázku 34. Vyhodnocovaná délka l_n byla i v tomto případě nastavená na 12,5 mm, na které přístroj zaznamenal pět hodnot a po jejich zprůměrování se získala výsledná hodnota daného parametru drsnosti.



Obr. 33 Průběh měření drsnosti u vzorku z Cu-ETP.



Obr. 34 Zvolená plocha pro měření drsnosti.



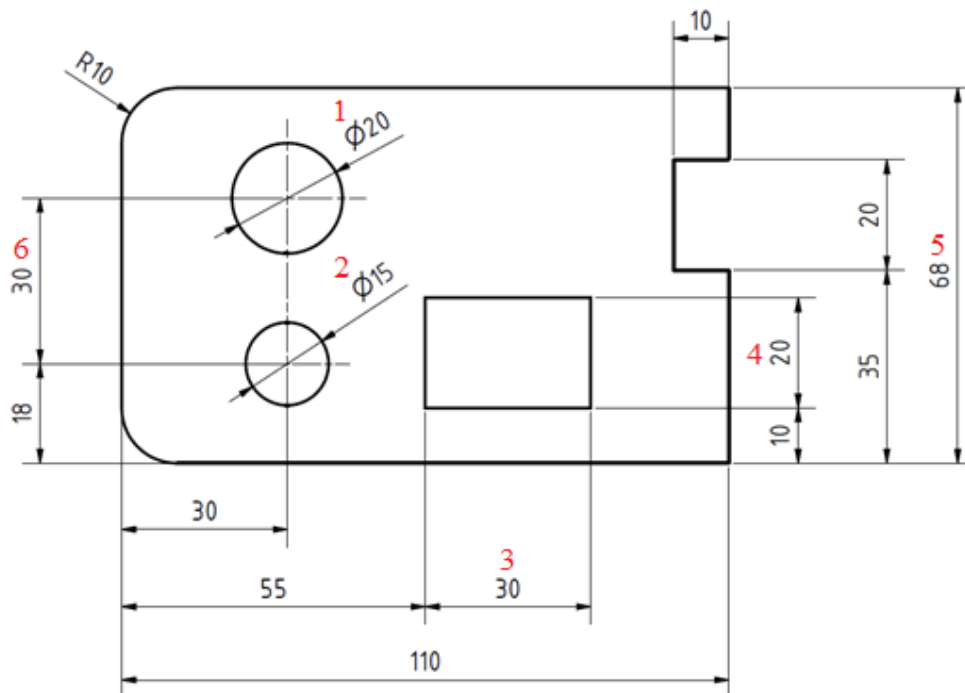
Obr. 35 Směr pohybu a umístění měřicího hrotu na testované ploše.

Z měření u všech zhotovených vzorků se zaznamenávala hodnota parametru drsnosti R_a neboli střední aritmetická odchylka daného povrchu. Podle normy ČSN EN ISO 9013 je možné určit

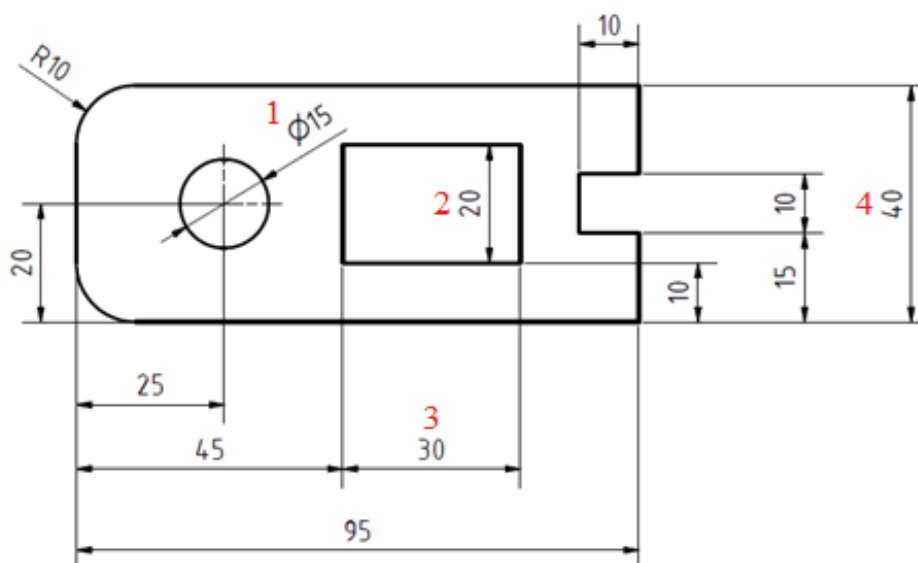
jakost řezu pro různé metody tepelného dělení, ale v případě kusů z hliníku, titanu, hořčíku, mědi a jejich slitin není možné k hodnocení použít tuto normu. Z tohoto důvodu nebyl parametr drsnosti Rz neboli průměrná výška prvků profilu zaznamenáván.

Měření rozměrové přesnosti vzorků

Pro měření rozměrové přesnosti všech vyrobených kusů bylo použito digitální posuvné měřítko. U vzorků zhotovených z materiálu EN AW 5754 bylo vybráno několik rozměrů, které byly změřeny a následně porovnány s hodnotami rozměrů na výkrese. Měřené rozměry pro vzorky z EN AW 5754 jsou zobrazeny na obrázku 36, kde červenými čísly jsou označeny jednotlivé měřené rozměry. V případě vzorků z Cu-ETP bylo také vybráno několik rozměrů, které byly změřeny a následně porovnány s hodnotami na výkrese. Na obrázku 37 jsou znázorněny měřené rozměry pro vzorky z Cu-ETP, kde měřené rozměry jsou označeny červenými čísly.



Obr. 36 Měřené rozměry na vzorku z materiálu EN AW 5754.



Obr. 37 Měřené rozměry na vzorku z materiálu Cu-ETP.

5.3 Experiment část 1.

Tato podkapitola je zaměřená na výrobu vzorků a získané výsledky z jednotlivých provedených měření, jež byly popsány v kapitole 5.2. V této části experimentu se jedná pouze o vzorky zhotovené z materiálu EN AW 5754. Celkově bylo vyrobeno 25 vzorků, u kterých následně proběhlo měření.

Výroba vzorků

Vzorky byly zhotoveny pouze z materiálu EN AW 5754 o tloušťce 3 mm. Jejich výroba probíhala na pracovišti firmy VOP GROUP, s.r.o. pomocí laseru DURMA HD-F 3015BH metodou tavného řezání za použití dusíku. Jak již bylo zmíněno v experimentu je sledován vliv rychlosti, výkonu a tlaku použitého plynu na drsnost řezné plochy a rozměrovou přesnost vyrobených kusů. Celkově bylo zhotoveno 25 vzorků, kde 8 vzorků bylo zhotoveno pro každý sledovaný parametr a 1 vzorek byl vyroben při výchozím nastavení parametrů. Řezné parametry byly nastaveny na výchozí hodnoty a při výrobě vzorků byla vždy postupně měněna hodnota pouze u jednoho z parametrů. Nastavené řezné podmínky pro výrobu jednotlivých kusů je možné vidět v tabulce 10. U všech vyrobených kusů bylo možné pozorovat jemný rovnoměrný ořep, který by byl v případě potřeby odstraněn pásovou bruskou.

Tab. 10 Nastavené řezné parametry pro řezání vzorků.

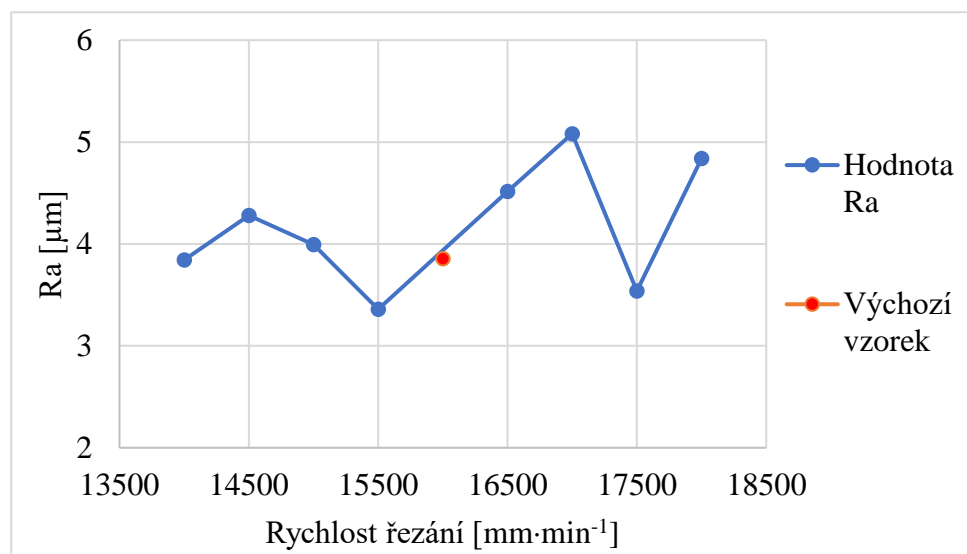
	Označení vzorků		
	1–8	9–16	17–24
Rychlost řezání [mm·min ⁻¹]	14 000–18 000	16 000	16 000
Výkon laseru [W]	6 000	4 500–6 900	6 000
Tlak použitého plynu [bar]	12	12	8–16
Čočka	F150		
Frekvence [Hz]	5 000		
Vzdálenost trysky [mm]	1		

Naměřené hodnoty parametrů struktury povrchu

V tabulce 11 jsou zaznamenány naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra pro vzorky s označením 1 až 8. U těchto vzorků byla postupně měněna pouze hodnota rychlosti řezání při konstantní hodnotě výkonu laseru a tlaku použitého plynu. Na obrázku 38 je možné vidět závislost parametru Ra na rychlosti řezání.

Tab. 11 Naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra.

Označení vzorků	Rychlost řezání [mm·min ⁻¹]	Naměřené hodnoty Ra [μm]					Průměrná hodnota Ra [μm]
		1	2	3	4	5	
1	14 000	3,981	4,475	3,469	3,956	3,337	3,844
2	14 500	4,506	4,534	3,252	4,713	4,400	4,281
3	15 000	3,582	3,708	3,888	3,825	4,965	3,994
4	15 500	2,717	3,539	3,595	3,244	3,700	3,359
5	16 500	3,335	3,904	4,452	4,700	6,180	4,514
6	17 000	6,016	5,700	4,575	3,524	5,594	5,082
7	17 500	3,643	3,948	2,607	3,438	4,053	3,538
8	18 000	4,258	5,850	5,980	5,258	2,850	4,839



Obr. 38 Graf závislosti parametru Ra na rychlosti řezání.

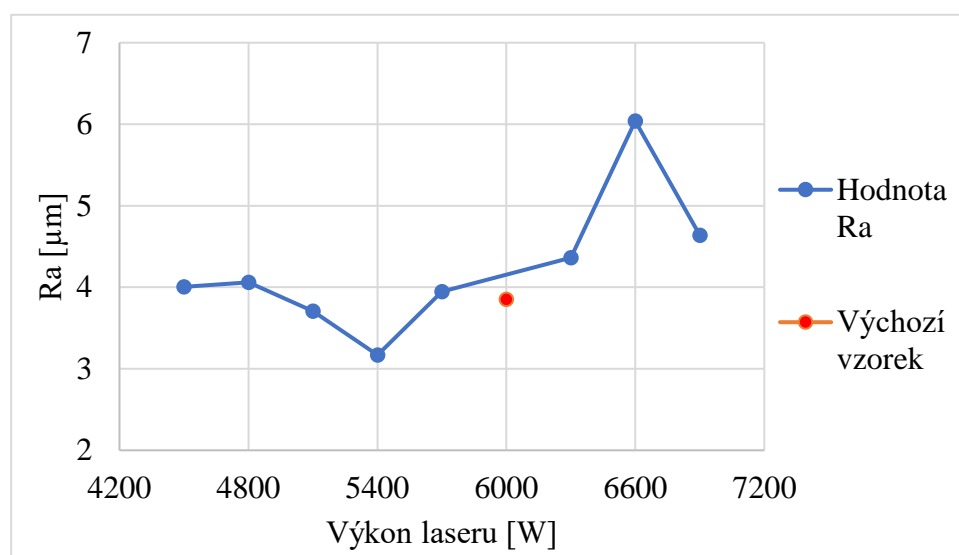
V grafu na obrázku 38 je možné vidět hodnoty Ra pro různé rychlosti řezání. Ra u měřených vzorků se pohybuje v rozmezí 3,359 μm až 5,082 μm. Nejnižší hodnotu Ra vykazuje vzorek číslo 4 a v opačném případě nejvyšší hodnotu Ra vykazuje vzorek 6. Ra u vzorků 1 až 4 je nižší než tomu je u vzorků 5, 6 a 8, které byly vyrobeny za vyšších rychlostí řezání. U vzorků vyrobených při nižších rychlostech řezání mohlo docházet k lepšímu odstraňování taveniny, což by vedlo k hladšímu povrchu. Na základě naměřených hodnot se jako optimální volba rychlosti řezání jeví hodnota v rozmezí 14 000 mm·min⁻¹ až 16 000 mm·min⁻¹.

Tabulka 12 obsahuje naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra pro vzorky s označením 9 až 16. U těchto vzorků byla postupně měněna pouze hodnota výkonu laseru při

konstantní hodnotě rychlosti řezání a tlaku použitého plynu. Na obrázku 39 je zobrazena závislost parametru Ra na výkonu laseru.

Tab. 12 Naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra.

Označení vzorků	Výkon laseru [W]	Naměřené hodnoty Ra [μm]					Průměrná hodnota Ra [μm]
		1	2	3	4	5	
9	4 500	4,029	4,361	4,521	3,695	3,416	4,005
10	4 800	3,340	3,283	4,609	3,751	5,325	4,062
11	5 100	3,542	4,537	3,483	3,620	3,342	3,705
12	5 400	2,875	3,117	3,618	2,777	3,458	3,169
13	5 700	3,461	2,801	5,279	3,912	4,288	3,948
14	6 300	4,925	4,573	3,899	5,138	3,280	4,363
15	6 600	8,007	6,134	5,810	4,013	6,230	6,039
16	6 900	4,686	3,931	3,794	3,749	7,036	4,639



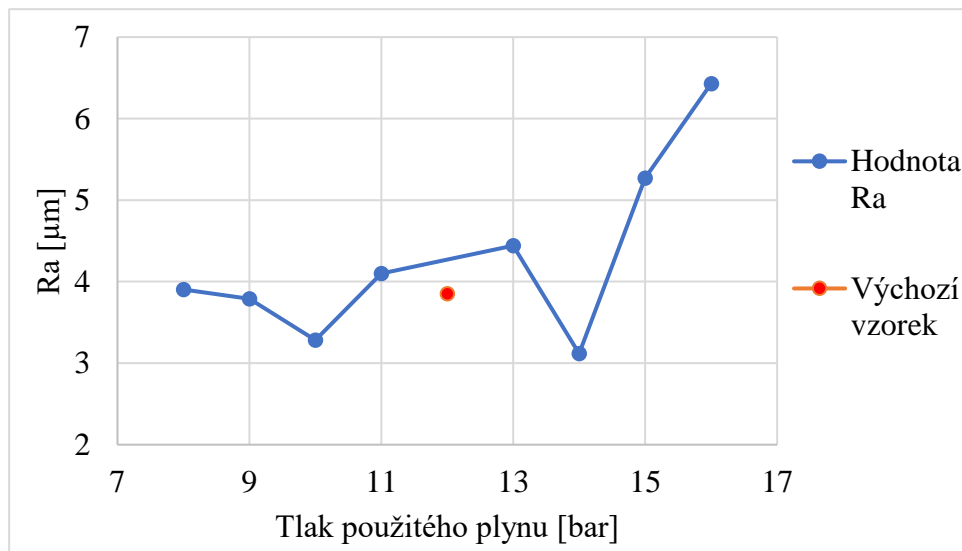
Obr. 39 Graf závislosti parametru Ra na výkonu laseru.

Graf na obrázku 39 zobrazuje naměřené hodnoty Ra u vzorků, které byly vyrobeny za různých hodnot výkonu. Hodnota Ra se pohybuje v rozmezí 3,169 μm až 6,039 μm . Vzorek číslo 12 vykazuje nejnižší hodnotu Ra, kdežto vzorek číslo 15 vykazuje nejvyšší hodnotu Ra. Z teoretického hlediska, pokud výkon laseru neboli intenzita energie dodaná do materiálu roste, tepelně ovlivněná oblast a deformace mohou být větší, což by mohlo způsobit zvýšení drsnosti. Na základě naměřených hodnot Ra je možné vidět přibližně stoupající trend s rostoucím výkonem, pokud se v úvahu nebudou brát vzorky 11, 12 a 16. Na základě naměřených hodnot se jako optimální volba výkonu jeví hodnota v rozmezí 4 500 W až 6 000 W.

V tabulce 13 jsou zaznamenány naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra pro vzorky s označením 17 až 24. U těchto vzorků byla postupně měněna pouze hodnota tlaku použitého plynu při konstantní hodnotě rychlosti řezání a výkonu laseru. Na obrázku 40 je zobrazena závislost parametru Ra na tlaku použitého plynu.

Tab. 13 Naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra.

Označení vzorků	Tlak použitého plynu [bar]	Naměřené hodnoty Ra [μm]					Průměrná hodnota Ra [μm]
		1	2	3	4	5	
17	8	4,038	4,465	3,655	3,354	4,013	3,905
18	9	3,717	3,679	3,986	3,375	4,199	3,791
19	10	3,357	3,148	2,916	3,440	3,558	3,284
20	11	4,381	3,122	4,694	3,729	4,573	4,100
21	13	4,822	3,873	4,859	4,408	4,246	4,442
22	14	3,211	3,436	1,918	4,012	3,008	3,117
23	15	5,482	6,193	5,446	4,829	4,401	5,270
24	16	5,377	5,391	6,372	8,660	6,351	6,430



Obr. 40 Graf závislosti parametru Ra na tlaku použitého plynu.

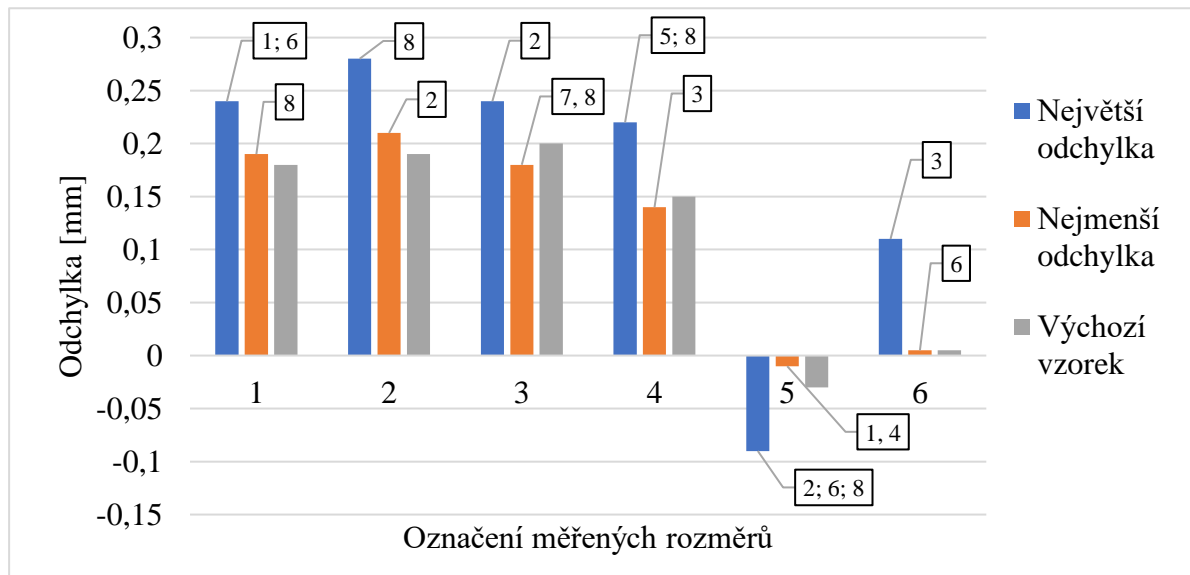
V grafu na obrázku 40 jsou zobrazeny naměřené hodnoty Ra vzorků, které byly vyrobeny při různých hodnotách tlaku použitého plynu. Hodnota Ra se pohybuje v rozmezí 3,117 μm až 6,430 μm . Nejnižší hodnotu Ra vykazuje vzorek číslo 22 a nejvyšší hodnotu Ra vykazuje vzorek číslo 24. Na základě měření nejnižších hodnot Ra se dosáhlo při použití tlaku 8 bar až 10 bar, pokud se nebude uvažovat vzorek číslo 22. Od tlaku 11 bar hodnota Ra převážně rostla s výjimkou vzorku 22, a z tohoto důvodu bude optimální pro tento proces řezání zvolit hodnotu tlaku mezi 8 bar až 10 bar, aby bylo dosaženo co nejnižší hodnoty Ra.

Rozměrová přesnost vzorků

Tabulka 14 obsahuje naměřené hodnoty zkoumaných rozměrů pro vzorky s označením 1 až 8. V průběhu výroby těchto vzorků byla postupně měněna pouze hodnota rychlosti řezání při zachování hodnoty tlaku použitého plynu a výkonu stroje. Naměřené hodnoty jednotlivých rozměrů byly následně porovnány s hodnotami na výkrese. Na obrázku 41 je zobrazena pouze největší a nejmenší odchylka změřeného rozměru od rozměru zadaného na výkrese a odchylka rozměru výchozího vzorku od rozměru na výkrese. Číslo nad sloupci v grafu (obr. 41) označuje číslo vzorku, který dosáhl této odchylky.

Tab. 14 Naměřené hodnoty zvolených rozměrů.

Označení vzorků	Rychlost řezání [mm·min ⁻¹]	Naměřené hodnoty vybraných rozměrů [mm]					
		1	2	3	4	5	6
1	14 000	19,76	14,76	29,79	19,80	68,01	29,990
2	14 500	19,78	14,79	29,76	19,84	68,09	29,985
3	15 000	19,79	14,73	29,78	19,86	68,05	29,890
4	15 500	19,80	14,78	29,79	19,82	68,01	29,940
5	16 500	19,78	14,77	29,79	19,78	68,02	29,915
6	17 000	19,76	14,77	29,81	19,80	68,09	29,995
7	17 500	19,79	14,73	29,82	19,81	68,04	29,980
8	18 000	19,81	14,72	29,82	19,78	68,09	29,975



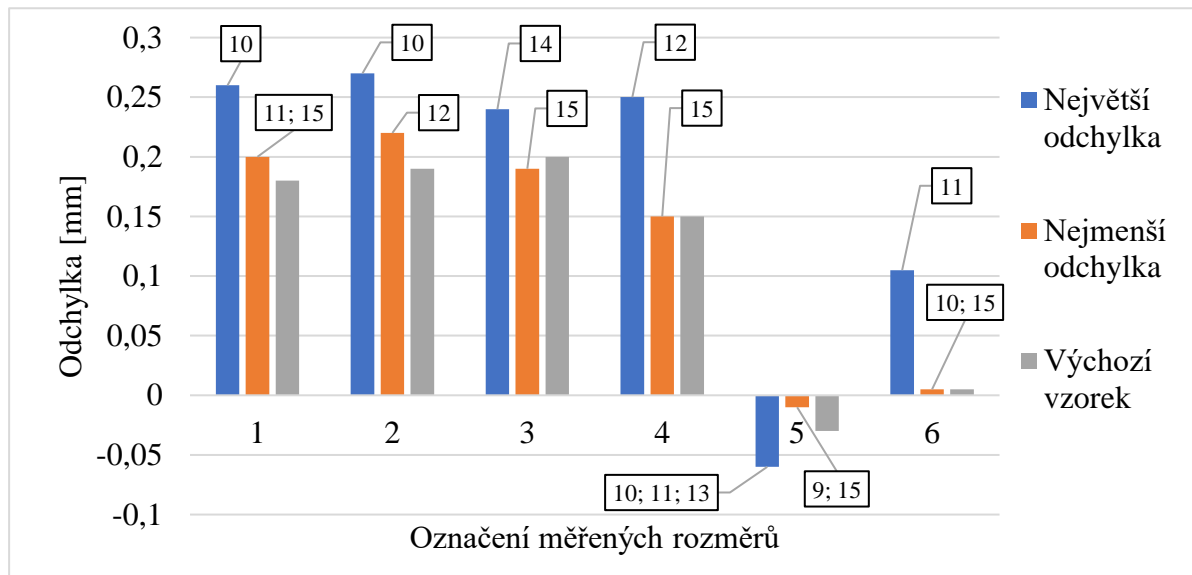
Obr. 41 Odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese.

V grafu na obrázku 41 jsou zobrazeny největší a nejmenší odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese pro vzorky 1 až 8. Na základě naměřených hodnot není možné zcela říct, zda rozměrová přesnost vyráběného vzorku bude přesnější při nižších nebo při vyšších rychlostech řezání. U některých rozměrů totiž vzorky, které byly vyrobeny za nižších rychlostí řezání vykazují menší odchylku a v některých případech menší odchylku vykazují vzorky vyrobené při vyšších rychlostech řezání.

V tabulce 15 jsou zaznamenány hodnoty změřených rozměrů vzorků s označením 9 až 16. Tyto vzorky byly řezány při konstantní hodnotě rychlosti řezání a tlaku použitého plynu. V průběhu výroby jednotlivých kusů byla postupně měněna pouze hodnota výkonu stroje. Obrázek 42 zobrazuje pouze největší a nejmenší odchylku změřeného rozměru od rozměru zadaného na výkrese a zároveň odchylku rozměru výchozího vzorku od rozměru na výkrese. Číslo nad sloupci v grafu (obr. 42) označuje číslo vzorku, jenž dosáhl této odchylky.

Tab. 15 Naměřené hodnoty zvolených rozměrů.

Označení vzorků	Výkon laseru [W]	Naměřené hodnoty vybraných rozměrů [mm]					
		1	2	3	4	5	6
9	4 500	19,79	14,75	29,80	19,80	68,01	29,960
10	4 800	19,74	14,73	29,77	19,79	68,06	29,995
11	5 100	19,80	14,75	29,80	19,84	68,06	29,895
12	5 400	19,75	14,78	29,78	19,75	68,02	29,965
13	5 700	19,77	14,75	29,79	19,82	68,06	29,910
14	6 300	19,79	14,77	29,76	19,80	68,02	29,990
15	6 600	19,80	14,75	29,81	19,85	68,01	29,995
16	6 900	19,78	14,74	29,79	19,79	68,02	29,900



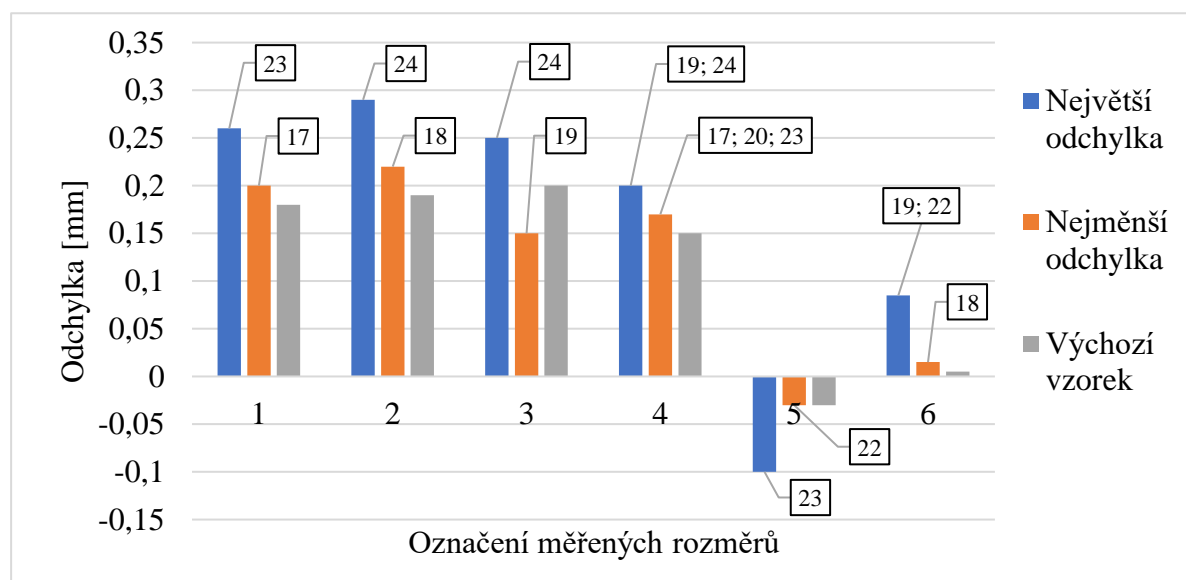
Obr. 42 Odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese.

V grafu na obrázku 42 je možné vidět největší a nejmenší odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese pro vzorky 9 až 16. Odchylky naměřených rozměrů také zcela nevypovídají o faktu, zda rozměrová přesnost vyráběného vzorku bude lepší při nižším nebo vyšším výkonu, jelikož například u rozměru, který je označen číslem 5 dosahuje nejmenší odchylky vzorek 9 a zároveň 15. Z hlediska počtu nejmenších odchylek pro daný vzorek, lze konstatovat, že vzorek s nejlepší rozměrovou přesností je vzorek číslo 15.

Tabulka 16 obsahuje naměřené hodnoty rozměrů vzorků, které mají označení 17 až 24. Výroba těchto vzorků probíhala za konstantní hodnoty rychlosti řezání a výkonu laseru. Postupně byla měněna pouze hodnota tlaku použitého plynu. Na obrázku 43 je zobrazena pouze největší a nejmenší odchylka změřeného rozměru od rozměru zadaného na výkrese a odchylka rozměru výchozího vzorku od rozměru na výkrese. Číslo nad sloupci v grafu (obr. 43) označuje číslo vzorku, který dosáhl této odchylky.

Tab. 16 Naměřené hodnoty zvolených rozměrů.

Označení vzorků	Tlak použitého plynu [bar]	Naměřené hodnoty vybraných rozměrů [mm]					
		1	2	3	4	5	6
17	8	19,80	14,76	29,82	19,83	68,06	29,960
18	9	19,79	14,78	29,80	19,82	68,04	29,985
19	10	19,77	14,72	29,85	19,80	68,05	29,915
20	11	19,79	14,75	29,81	19,83	68,06	29,920
21	13	19,77	14,73	29,79	19,81	68,05	29,920
22	14	19,75	14,76	29,78	19,81	68,03	29,915
23	15	19,74	14,72	29,77	19,83	68,10	29,920
24	16	19,75	14,71	29,75	19,80	68,05	29,950



Obr. 43 Odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese.

Graf na obrázku 43 zobrazuje největší a nejmenší odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese pro vzorky 17 až 24. Na základě naměřených hodnot rozměrů se nejlépe jeví výchozí vzorek, který má ve většině případů u zkoumaných rozměrů nejmenší odchylku. Z tohoto důvodu bude optimální volba hodnoty tlaku 12 bar pro tento proces řezání.

5.4 Experiment část 2.

Tato část je zaměřena na výrobu jednotlivých vzorků a výsledky z provedených měření, jež jsou popsány v kapitole 5.2. V tomto případě se jedná pouze o vzorky zhotovené z materiálu Cu-ETP. V celkovém počtu bylo vyrobeno 25 kusů stejně jako v případě materiálu EN AW 5754.

Výroba vzorků

Všechny vzorky byly zhotoveny pouze z materiálu Cu-ETP o tloušťce 1 mm. Výroba vzorků proběhla na pracovišti firmy VOP GROUP, s.r.o. za použití laseru DURMA HD-F 3015BH

metodou oxidačního řezání při použití kyslíku. Zhotoveno bylo 25 vzorků, přičemž 8 vzorků pro každý sledovaný parametr a 1 vzorek byl vyroben při výchozím nastavení parametrů. Řezné parametry byly nastaveny na výchozí hodnoty a v průběhu výroby jednotlivých kusů byla vždy postupně měněna hodnota pouze u jednoho z parametrů. V tabulce 17 jsou zaznamenány řezné podmínky, při kterých byly vyrobeny dané vzorky.

Tab. 17 Nastavené řezné parametry pro řezání vzorků.

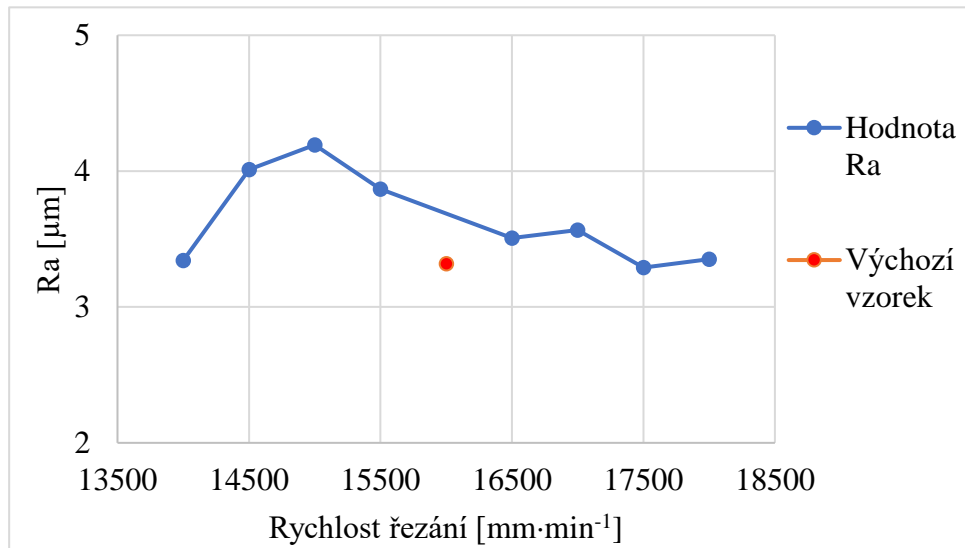
		Označení vzorků		
		1–8	9–16	17–24
Rychlost řezání	[mm·min⁻¹]	14 000–18 000	16 000	16 000
Výkon laseru	[W]	6 000	4 500–6 900	6 000
Tlak použitého plynu	[bar]	8	8	4–12
Čočka		F150		
Frekvence	[Hz]	5 000		
Vzdálenost trysky	[mm]	1		

Naměřené hodnoty parametrů struktury povrchu

V tabulce 18 jsou uvedeny naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra pro vzorky s označením 1 až 8. U těchto vzorků byla postupně měněna pouze hodnota rychlosti řezání při zachování hodnoty výkonu laseru a tlaku použitého plynu. Na obrázku 44 je zobrazena závislost parametru Ra na rychlosti řezání.

Tab. 18 Naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra.

Označení vzorků	Rychlost řezání [mm·min ⁻¹]	Naměřené hodnoty Ra [μm]					Průměrná hodnota Ra [μm]
		1	2	3	4	5	
1	14 000	2,754	3,596	3,765	3,275	3,323	3,343
2	14 500	3,922	4,435	3,453	3,494	4,750	4,011
3	15 000	4,978	3,623	3,937	4,642	3,786	4,193
4	15 500	3,535	3,933	3,376	4,385	4,105	3,867
5	16 500	3,752	3,398	3,252	3,298	3,835	3,507
6	17 000	3,541	3,666	3,265	3,688	3,675	3,567
7	17 500	4,137	2,855	3,192	3,094	3,172	3,290
8	18 000	3,491	3,444	3,025	3,605	3,200	3,353



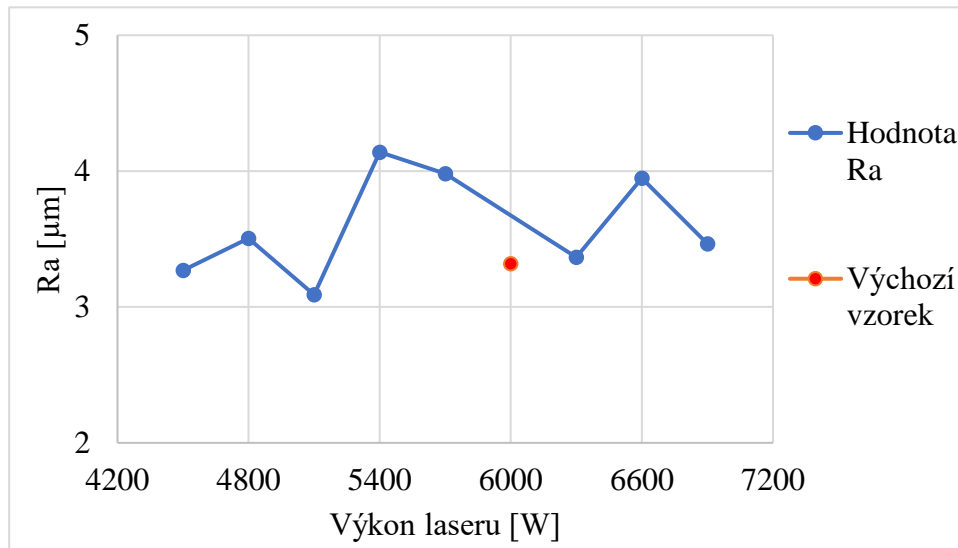
Obr. 44 Graf závislosti parametru Ra na rychlosti řezání.

V grafu na obrázku 44 jsou zobrazeny hodnoty Ra pro jednotlivé rychlosti řezání. Hodnota Ra se pohybuje v rozmezí 3,290 μm až 4,193 μm. Nejnížší hodnota Ra byla naměřena u vzorku 7, kdežto nejvyšší hodnota Ra byla zjištěna u vzorku 3. Při nižších rychlostech řezání, pokud nebude uvažován vzorek 1 je hodnota Ra vyšší, než tomu je u vzorků, které byly vyrobeny při vyšších rychlostech řezání. Tento jev může být způsoben delším působením laserového paprsku na materiál v případě nižších rychlostí, což by mohlo vést k výraznějším deformacím, a tedy k vyšší drsnosti povrchu. Na základě naměřených hodnot se jako optimální volba rychlosti řezání jeví hodnota v rozmezí 16 000 mm·min⁻¹ až 18 000 mm·min⁻¹, jelikož při těchto rychlostech bylo dosaženo nejnižších hodnot Ra.

Tabulka 19 obsahuje naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra pro vzorky s označením 9 až 16. V případě těchto vzorků byla postupně měněna pouze hodnota výkonu laseru při konstantní hodnotě rychlosti řezání a tlaku použitého plynu. Na obrázku 45 je možné vidět závislost parametru Ra na výkonu laseru.

Tab. 19 Naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra.

Označení vzorků	Výkon laseru [W]	Naměřené hodnoty Ra [μm]					Průměrná hodnota Ra [μm]
		1	2	3	4	5	
9	4 500	3,330	3,207	3,180	3,820	2,811	3,270
10	4 800	3,328	3,171	3,764	3,681	3,583	3,505
11	5 100	3,500	2,759	3,129	2,844	3,219	3,090
12	5 400	4,966	4,173	3,884	4,121	3,558	4,140
13	5 700	3,962	4,644	4,054	3,758	3,493	3,982
14	6 300	3,759	3,200	3,031	3,239	3,607	3,367
15	6 600	4,626	3,343	4,144	3,548	4,083	3,949
16	6 900	2,938	3,390	3,805	3,308	3,881	3,464



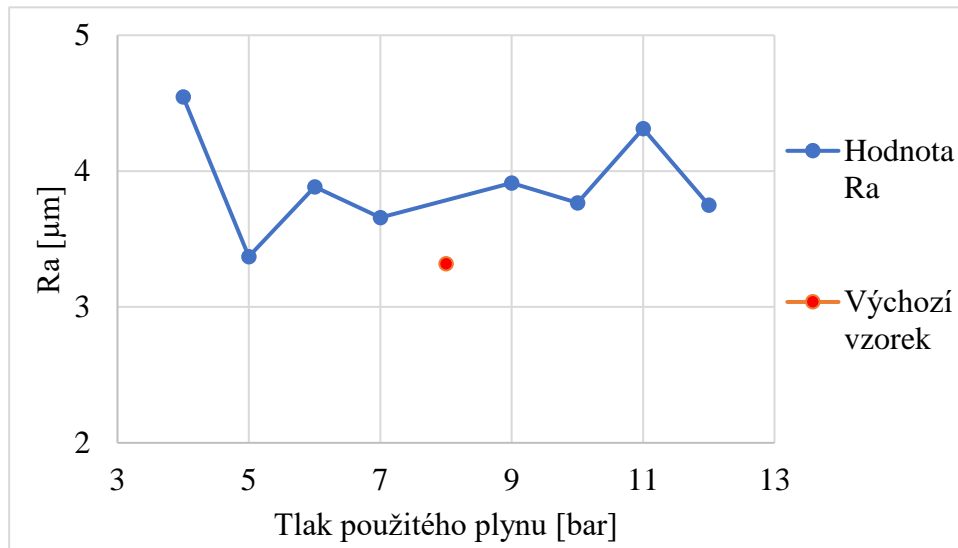
Obr. 45 Graf závislosti parametru Ra na výkonu laseru.

V grafu na obrázku 45 je možné vidět naměřené hodnoty Ra u vzorků 9 až 16, které byly vyrobeny za různých hodnot výkonu. Hodnota Ra se pohybuje v rozmezí 3,090 μm až 4,140 μm . Nejnižší hodnotu Ra vykazuje vzorek 11 a nejvyšší hodnotu vykazuje vzorek 12. Z hlediska teorie by vyšších hodnot Ra měly dosahovat vzorky vyrobené při vyšších výkonech, jelikož tepelné působení na materiál by bylo vyšší, což u naměřených hodnot téměř neodpovídá. Optimální volba hodnoty výkonu na základě naměřených hodnot pro tento proces řezání je v rozmezí 4 500 W až 5 100 W.

V tabulce 20 jsou zaznamenány naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra pro vzorky s označením 17 až 24. U těchto vzorků byla postupně měněna pouze hodnota tlaku použitého plynu při zachování konstantní hodnoty výkonu laseru a rychlosti řezání. Obrázek 46 zobrazuje závislost parametru Ra na tlaku použitého plynu.

Tab. 20 Naměřené hodnoty parametru struktury povrchu Ra.

Označení vzorků	Tlak použitého plynu [bar]	Naměřené hodnoty Ra [μm]					Průměrná hodnota Ra [μm]
		1	2	3	4	5	
17	4	4,476	5,576	4,678	4,046	3,954	4,546
18	5	3,134	3,794	3,466	3,103	3,357	3,371
19	6	3,377	3,819	3,443	4,244	4,543	3,885
20	7	3,667	4,375	3,437	3,622	3,192	3,658
21	9	4,051	4,922	3,783	3,593	3,215	3,913
22	10	4,065	3,685	4,155	3,136	3,796	3,767
23	11	3,958	4,023	4,486	4,079	5,017	4,313
24	12	3,766	4,183	3,615	3,549	3,643	3,751



Obr. 46 Graf závislosti parametru Ra na tlaku použitého plynu.

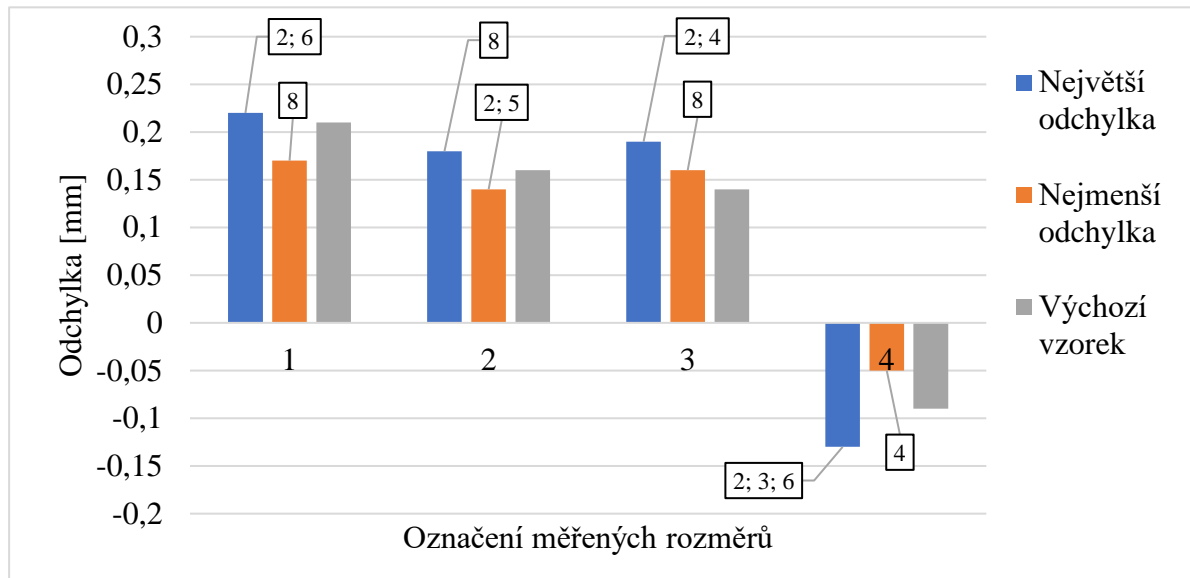
Na obrázku 46 je graf zobrazující naměřené hodnoty Ra vzorků 17 až 24, které byly vyrobeny při různých hodnotách tlaku použitého plynu. Hodnota Ra se pohybuje v rozmezí 3,371 μm až 4,546 μm . Nejnižší hodnotu Ra vykazuje vzorek 18 a v opačném případě nejvyšší hodnotu vykazuje vzorek 17. Pokud nebude uvažován vzorek 17, 18 a 23 hodnota Ra se u zbývajících vzorků liší jen minimálně, výjimku tvoří výchozí vzorek, který vykazuje nejnižší hodnotu Ra o hodnotě 3,318 μm . Zvýšená hodnota Ra u vzorku 17 může být způsobena horším odvodem vzniklých plynů během procesu řezání z řezné mezery. Optimální volba hodnoty tlaku se pohybuje v rozmezí 5 bar až 10 bar.

Rozměrová přesnost vzorků

Tabulka 21 zobrazuje naměřené hodnoty vybraných rozměrů vzorků s označením 1 až 8. Řezání jednotlivých kusů proběhlo při konstantní hodnotě výkonu stroje a tlaku použitého plynu. Měněna byla pouze hodnota rychlosti řezání. Na obrázku 47 je možné vidět největší a nejmenší odchylku změřeného rozměru od rozměru zadaného na výkrese a odchylku rozměru výchozího vzorku od rozměru na výkrese. Číslo nad sloupci v grafu (obr. 47) označuje číslo vzorku, který dosáhl této odchylky.

Tab. 21 Naměřené hodnoty zvolených rozměrů.

Označení vzorků	Rychlost řezání [mm·min ⁻¹]	Naměřené hodnoty vybraných rozměrů [mm]			
		1	2	3	4
1	14 000	14,81	19,85	29,82	40,09
2	14 500	14,78	19,86	29,81	40,13
3	15 000	14,80	19,84	29,82	40,13
4	15 500	14,79	19,84	29,81	40,05
5	16 500	14,80	19,86	29,83	40,09
6	17 000	14,78	19,84	29,82	40,13
7	17 500	14,82	19,85	29,82	40,11
8	18 000	14,83	19,82	29,84	40,12



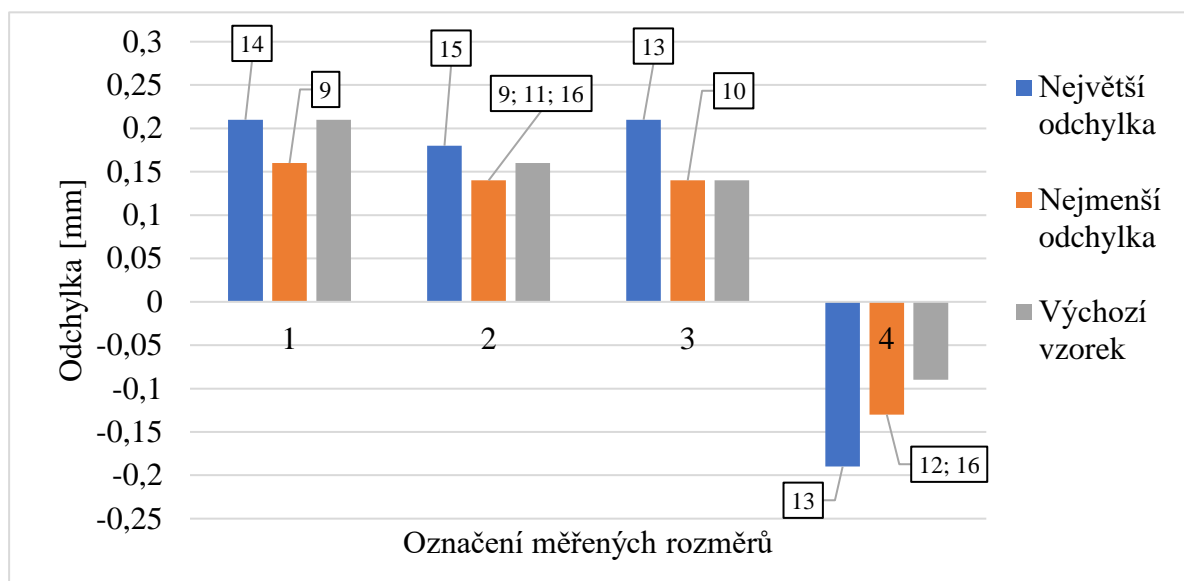
Obr. 47 Odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese.

V grafu na obrázku 47 jsou zobrazeny největší a nejmenší odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese pro vzorky 1 až 8. Na základě naměřených hodnot vybraných rozměrů není možné zcela říct, zda rozměrová přesnost řezaného vzorku bude přesnější při nižších nebo vyšších rychlostech řezání. Rozdíly mezi největšími a nejmenšími odchylkami u měřených rozměrů jsou velmi malé a největší z nich činí 0,08 mm.

V tabulce 22 jsou zaznamenány naměřené hodnoty rozměrů vzorků s označením 9 až 16. Během výroby těchto vzorků byla postupně měněna pouze hodnota výkonu stroje a hodnota rychlosti řezání a tlaku použitého plynu zůstala konstantní. Obrázek 48 zobrazuje pouze největší a nejmenší odchylku změřeného rozměru od rozměru zadaného na výkrese a odchylku rozměru výchozího vzorku od rozměru na výkrese. V grafu (obr. 48) číslo nad sloupci označuje číslo vzorku, jenž dosáhl této odchylky.

Tab. 22 Naměřené hodnoty zvolených rozměrů.

Označení vzorků	Výkon laseru [W]	Naměřené hodnoty vybraných rozměrů [mm]			
		1	2	3	4
9	4 500	14,84	19,86	29,82	40,15
10	4 800	14,82	19,85	29,86	40,16
11	5 100	14,83	19,86	29,83	40,16
12	5 400	14,81	19,85	29,84	40,13
13	5 700	14,80	19,84	29,79	40,19
14	6 300	14,79	19,85	29,81	40,16
15	6 600	14,81	19,82	29,81	40,17
16	6 900	14,83	19,86	29,82	40,13



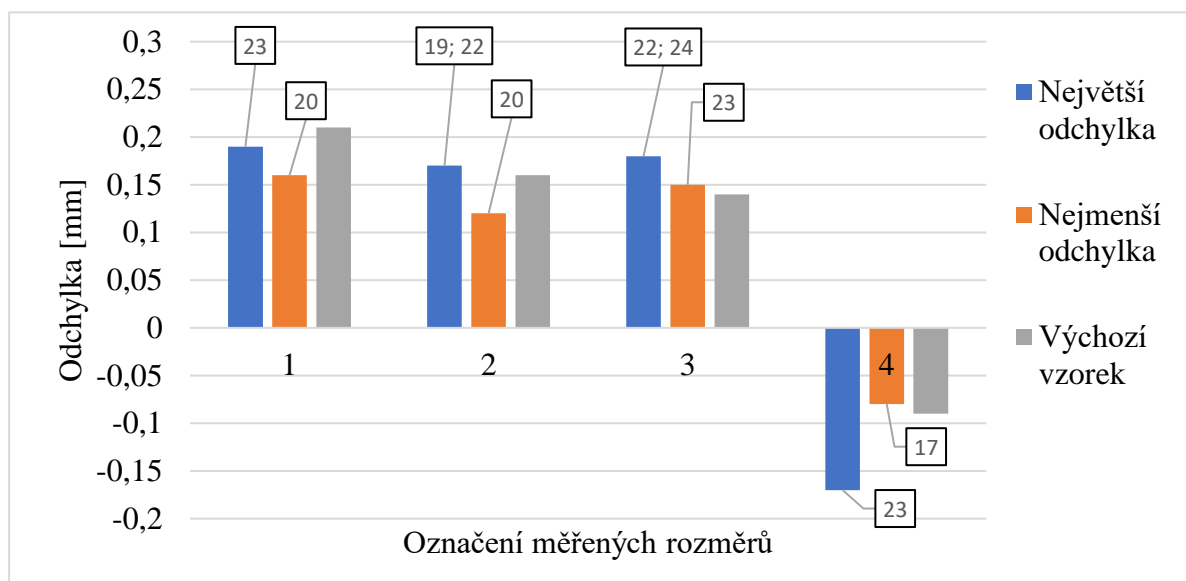
Obr. 48 Odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese.

V grafu na obrázku 48 je možné vidět největší a nejmenší odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese pro vzorky 9 až 16. Odchylky naměřených rozměrů také zcela nevypovídají o faktu, zda lepší rozměrové přesnosti bude dosaženo při nižším nebo vyšším výkonu, jelikož například v případě rozměru, který je označen číslem 2 dosahuje nejmenší odchylky vzorek 9 a zároveň 16. Rozdíly mezi největšími a nejmenšími odchylkami jsou i v tomto případě velmi malé a největší z nich činí 0,07 mm.

Tabulka 23 obsahuje naměřené hodnoty rozměrů vzorků s označením 17 až 24. Vzorky byly řezány při konstantní hodnotě rychlosti řezání a výkonu stroje. Měněna byla pouze hodnota tlaku použitého plynu. Obrázek 49 zobrazuje pouze největší a nejmenší odchylku změřeného rozměru od rozměru zadaného na výkrese a odchylku rozměru výchozího vzorku od rozměru na výkrese. Číslo nad sloupci v grafu (obr. 49) označuje číslo vzorku, který dosáhl této odchylky.

Tab. 23 Naměřené hodnoty zvolených rozměrů.

Označení vzorků	Tlak použitého plynu [bar]	Naměřené hodnoty vybraných rozměrů [mm]			
		1	2	3	4
17	4	14,82	19,86	29,84	40,08
18	5	14,82	19,87	29,83	40,11
19	6	14,83	19,83	29,84	40,12
20	7	14,84	19,88	29,83	40,15
21	9	14,82	19,86	29,83	40,12
22	10	14,82	19,83	29,82	40,13
23	11	14,81	19,85	29,85	40,17
24	12	14,82	19,86	29,82	40,16



Obr. 49 Odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese.

Graf na obrázku 49 zobrazuje největší a nejmenší odchylky změřených rozměrů od rozměrů na výkrese pro vzorky 17 až 24. V tomto případě také není zcela patrné, zda lepší rozměrové přesnosti bude dosaženo při nižším nebo vyšším tlaku. Rozdíly mezi největšími a nejmenšími odchytkami jsou i v tomto případě velmi malé a největší z nich činí 0,09 mm.

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Poslední část této diplomové práce se zaměřuje na posouzení ekonomiky řezání pomocí vláknového laseru DURMA HD-F 3015BH a konkrétně při řezání materiálu EN AW 5754 o tloušťce 3 mm, Cu-ETP o tloušťce 1 mm a S235JRC+N o tloušťce 3 mm. Cíl této kapitoly tedy spočívá v určení nákladů na hodinu řezání pro jednotlivé zmíněné materiály a určení ceny za metr řezu. Do výpočtu hodinové sazby zvoleného vláknového laseru jsou zahrnuty následující parametry:

- pořizovací cena laseru – 11 237 455 Kč,
- mzda operátora laseru – 230 Kč·h⁻¹ (včetně všech odvodů),
- spotřeba elektrické energie – 3,70 Kč·kWh⁻¹,
- spotřeba technických plynů – 18,35 Kč·kg⁻¹ (dusík), 23,22 Kč·kg⁻¹ (kyslík),
- náklady na opravu stroje za rok – 30 000 Kč.

Uvedené hodnoty parametrů použité ve výpočtu byly dodány firmou VOP GROUP, s.r.o. Ve výpočtu je počítáno s jednosměrným osmihodinovým provozem a je předpokládáno 252 pracovních dní za rok, což činí 2 016 pracovních hodin za rok. V tabulce 24 jsou zobrazeny hodnoty parametrů pro řezání jednotlivých materiálů.

Tab. 24 Hodnoty řezných parametrů pro jednotlivé materiály.

	Materiály		
	EN AW 5754	Cu-ETP	S235JRC+N
Rychlost řezání [mm·min ⁻¹]	16 000	16 000	4 200
Tlak plynu [bar]	12	8	0,7
Druh použitého plynu	dusík	kyslík	kyslík
Výkon laser [kW]	6	6	3,4
Příkon laseru [kW]	17	17	9,7
Průměr trysky [mm]	2	1,5	1,2

Výpočet hodinové sazby laseru a ceny za metr řezu při řezání materiálu EN AW 5754 o tloušťce 3 mm:

- Odpisy vláknového laseru za hodinu:

$$N_{odpis} = \frac{N_{odpis/rok}}{t_{pr/rok}}, \quad (6.1)$$

$$N_{odpis} = \frac{1\,123\,745,5}{2\,016} = 557,41 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: $N_{odpis/rok}$ – roční odpis laseru po dobu deseti let [Kč],

$t_{pr/rok}$ – pracovní hodiny za rok [h].

- Cena spotřeby elektrické energie laseru při řezání za hodinu:

$$N_{energie} = P_p \cdot N_{cena/kWh}, \quad (6.2)$$

$$N_{energie} = 17 \cdot 3,7 = 62,9 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: P_p – příkon laseru [kW],

$N_{cena/kWh}$ – cena elektřiny [Kč·kWh⁻¹].

- Cena spotřeby plynu (dusíku) za hodinu:

$$N_{\text{plyn}} = m_N \cdot N_{\text{cena/kg}}, \quad (6.3)$$

$$N_{\text{plyn}} = 36,09 \cdot 18,35 = 662,25 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: m_N – spotřeba hmotnosti dusíku za hodinu [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$],

$N_{\text{cena/kg}}$ – cena dusíku [$\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$].

- Cena oprav za hodinu:

$$N_{\text{opravy}} = \frac{N_{\text{opravy/rok}}}{t_{\text{pr/rok}}}, \quad (6.4)$$

$$N_{\text{opravy}} = \frac{30\,000}{2\,016} = 14,88 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: $N_{\text{opravy/rok}}$ – cena za opravy za rok [Kč],

$t_{\text{pr/rok}}$ – pracovní hodiny za rok [h].

- Hodinová sazba:

$$N_{\text{sazba}} = N_{\text{odpis}} + N_{\text{energie}} + N_{\text{plyn}} + N_{\text{opravy}} + N_{\text{mzda}}, \quad (6.5)$$

$$N_{\text{sazba}} = 557,41 + 62,9 + 662,25 + 14,88 + 230 = 1\,527,44 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: N_{odpis} – odpisy vláknového laseru za hodinu [$\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}$],

N_{energie} – cena spotřeby elektrické energie laseru při řezání za hodinu [$\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}$],

N_{plyn} – cena spotřeby plynu (dusíku) za hodinu [$\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}$],

N_{opravy} – cena oprav za hodinu [$\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}$],

N_{mzda} – hodinová mzda operátora laseru [$\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}$].

- Cena za metr řezu:

$$N_{\text{metr}} = \frac{N_{\text{sazba}}}{v}, \quad (6.6)$$

$$N_{\text{metr}} = \frac{1\,527,44}{960} = 1,59 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-1}$$

kde: N_{sazba} – hodinová sazba laseru [$\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}$],

v – rychlost řezání [$\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$].

Výpočet hodinové sazby laseru a ceny za metr řezu při řezání materiálu Cu-ETP o tloušťce 1 mm:

- Odpisy vláknového laseru za hodinu:

$$N_{\text{odpis}} = \frac{N_{\text{odpis/rok}}}{t_{\text{pr/rok}}}, \quad (6.7)$$

$$N_{\text{odpis}} = \frac{1\,123\,745,5}{2\,016} = 557,41 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: $N_{\text{odpis/rok}}$ – roční odpis laseru po dobu deseti let [Kč],

$t_{\text{pr/rok}}$ – pracovní hodiny za rok [h].

- Cena spotřeby elektrické energie laseru při řezání za hodinu:

$$N_{\text{energie}} = P_p \cdot N_{\text{cena/kWh}}, \quad (6.8)$$

$$N_{\text{energie}} = 17 \cdot 3,7 = 62,9 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: P_p – příkon laseru [kW],

$N_{\text{cena/kWh}}$ – cena elektřiny [Kč·kWh⁻¹].

- Cena spotřeby plynu (kyslíku) za hodinu:

$$N_{\text{plyn}} = m_o \cdot N_{\text{cena/kg}}, \quad (6.9)$$

$$N_{\text{plyn}} = 16,12 \cdot 23,22 = 374,31 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: m_o – spotřeba hmotnosti kyslíku za hodinu [kg·h⁻¹],

$N_{\text{cena/kg}}$ – cena kyslíku [Kč·kg⁻¹].

- Cena oprav za hodinu:

$$N_{\text{opravy}} = \frac{N_{\text{opravy/rok}}}{t_{\text{pr/rok}}}, \quad (6.10)$$

$$N_{\text{opravy}} = \frac{30\,000}{2\,016} = 14,88 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: $N_{\text{opravy/rok}}$ – cena za opravy za rok [Kč],

$t_{\text{pr/rok}}$ – pracovní hodiny za rok [h].

- Hodinová sazba:

$$N_{\text{sazba}} = N_{\text{odpis}} + N_{\text{energie}} + N_{\text{plyn}} + N_{\text{opravy}} + N_{\text{mzda}}, \quad (6.11)$$

$$N_{\text{sazba}} = 557,41 + 62,9 + 374,31 + 14,88 + 230 = 1\,239,5 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: N_{odpis} – odpisy vláknového laseru za hodinu [Kč·h⁻¹],

N_{energie} – cena spotřeby elektrické energie laseru při řezání za hodinu [Kč·h⁻¹],

N_{plyn} – cena spotřeby plynu (kyslíku) za hodinu [Kč·h⁻¹],

N_{opravy} – cena oprav za hodinu [Kč·h⁻¹],

N_{mzda} – hodinová mzda operátora laseru [Kč·h⁻¹].

- Cena za metr řezu:

$$N_{\text{metr}} = \frac{N_{\text{sazba}}}{v}, \quad (6.12)$$

$$N_{\text{metr}} = \frac{1\,239,5}{960} = 1,29 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-1}$$

kde: N_{sazba} – hodinová sazba laseru [Kč·h⁻¹],

v – rychlost řezání [m·h⁻¹].

Výpočet hodinové sazby laseru a ceny za metr řezu při řezání materiálu S235JRC+N o tloušťce 3 mm:

- Odpisy vláknového laseru za hodinu:

$$N_{odpis} = \frac{N_{odpis/rok}}{t_{pr/rok}}, \quad (6.13)$$

$$N_{odpis} = \frac{1\,123\,745,5}{2\,016} = 557,41 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: $N_{odpis/rok}$ – roční odpis laseru po dobu deseti let [Kč],
 $t_{pr/rok}$ – pracovní hodiny za rok [h].

- Cena spotřeby elektrické energie laseru při řezání za hodinu:

$$N_{energie} = P_p \cdot N_{cena/kWh}, \quad (6.14)$$

$$N_{energie} = 9,7 \cdot 3,7 = 35,89 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: P_p – příkon laseru [kW],
 $N_{cena/kWh}$ – cena elektřiny [Kč·kWh⁻¹].

- Cena spotřeby plynu (kyslíku) za hodinu:

$$N_{plyn} = m_0 \cdot N_{cena/kg}, \quad (6.15)$$

$$N_{plyn} = 1,97 \cdot 23,22 = 45,74 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: m_0 – spotřeba hmotnosti kyslíku za hodinu [kg·h⁻¹],
 $N_{cena/kg}$ – cena kyslíku [Kč·kg⁻¹].

- Cena oprav za hodinu:

$$N_{opravy} = \frac{N_{opravy/rok}}{t_{pr/rok}}, \quad (6.16)$$

$$N_{opravy} = \frac{30\,000}{2\,016} = 14,88 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: $N_{opravy/rok}$ – cena za opravy za rok [Kč],
 $t_{pr/rok}$ – pracovní hodiny za rok [h].

- Hodinová sazba:

$$N_{sazba} = N_{odpis} + N_{energie} + N_{plyn} + N_{opravy} + N_{mzda}, \quad (6.17)$$

$$N_{sazba} = 557,41 + 35,89 + 45,74 + 14,88 + 230 = 883,92 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde: N_{odpis} – odpisy vláknového laseru za hodinu [Kč·h⁻¹],
 $N_{energie}$ – cena spotřeby elektrické energie laseru při řezání za hodinu [Kč·h⁻¹],
 N_{plyn} – cena spotřeby plynu (kyslíku) za hodinu [Kč·h⁻¹],
 N_{opravy} – cena oprav za hodinu [Kč·h⁻¹],
 N_{mzda} – hodinová mzda operátora laseru [Kč·h⁻¹].

- Cena za metr řezu:

$$N_{metr} = \frac{N_{sazba}}{v}, \quad (6.18)$$

$$N_{metr} = \frac{883,92}{252} = 3,51 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-1}$$

kde: N_{sazba} – hodinová sazba laseru [$\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}$],
 v – rychlost řezání [$\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$].

V tabulce 25 je možné vidět vypočítané hodnoty hodinové sazby vláknového laseru DURMA HD-F 3015BH a ceny za metr řezu pro tři materiály o různých tloušťkách. Z hlediska hodinové sazby laseru se jako nejdražší varianta jeví řezání materiálu EN AW 5754 o tloušťce 3 mm, kde cena za hodinu řezání je 1 527,44 $\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}$. V případě ceny za metr řezu se jako nejdražší varianta jeví řezání S235JRC+N, kde cena za metr řezu je 3,51 $\text{Kč} \cdot \text{m}^{-1}$, na což má také vliv řezná rychlost, která je pro řezání tohoto materiálu nastavená na hodnotu téměř čtyřikrát menší, než v případě EN AW 5754 a Cu-ETP.

Tab. 25 Vypočítané hodnoty hodinové sazby a ceny za metr řezu.

	Materiály		
	EN AW 5754	Cu-ETP	S235JRC+N
Hodinová sazba [$\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}$]	1 527,44	1 239,5	883,92
Cena za metr řezu [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-1}$]	1,59	1,29	3,51

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabírala problematikou řezání lehkých a barevných kovů pomocí laseru. Diplomová práce se skládá z rešeršní a experimentální části. Rešeršní část byla zaměřena na rozbor fyzikálního principu řezání laserem, technologické možnosti řezání laserem a omezení pro jednotlivé materiály. Následovala experimentální část, která byla zaměřena na sledování vlivu rychlosti řezání, tlaku použitého plynu a výkonu stroje v závislosti na drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti vyrobených vzorků. Experimentální část byla rozdělena na dvě části z důvodu použití dvou materiálů. V případě všech vzorků byl použit pro dělení vláknový laser DURMA HD-F 3015BH. V poslední části této diplomové práce následovalo zhodnocení procesu řezání z hlediska ekonomiky.

Pro první část experimentu byl použit plech ze slitiny hliníku EN AW 5754 o tloušťce 3 mm. V průběhu experimentu bylo vyrobeno 8 vzorků pro každý sledovaný parametr a 1 vzorek, který byl řezán při výchozím nastavení řezných parametrů na stroji. Všechny vzorky byly řezány tavnou metodou za pomoci dusíku. Pro měření drsnosti povrchu byl použit profilometr a pro měření rozměrové přesnosti bylo použito digitální posuvné měřítko. Při sledování vlivu rychlosti řezání bylo dosaženo nejnižších hodnot Ra (3,359–4,281 μm) v intervalu 14 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ až 16 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Vliv při změně rychlosti řezání na přesnost nebyl patrný ve sledovaném rozmezí. Z hlediska výkonu laseru bylo nejnižších hodnot Ra (3,169–4,062 μm) dosaženo v intervalu 4 500 W až 6 000 W. V případě přesnosti změna výkonu neměla vliv ve zkoumaném rozsahu. Při sledování vlivu tlaku použitého plynu bylo nejnižších hodnot Ra (3,284–3,905 μm) dosaženo v rozmezí 8 bar až 10 bar. Z hlediska přesnosti se nejlépe jevil vzorek vyrobený při tlaku 12 bar.

Ve druhé části experimentu byl použit plech z mědi Cu-ETP o tloušťce 1 mm. V tomto případě bylo také vyrobeno 8 vzorků pro každý sledovaný parametr a 1 výchozí vzorek. Vzorky byly řezány oxidační metodou za pomoci kyslíku a metodika měření je stejná jako v případě první části experimentu. Při sledování vlivu rychlosti řezání bylo dosaženo nejnižších hodnot Ra (3,290–3,567 μm) v rozmezí 16 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ až 18 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Vliv na přesnost při změně rychlosti řezání nebyl patrný ve sledovaném rozmezí. V případě sledování vlivu výkonu bylo nejnižší hodnoty Ra (3,090 μm) dosaženo při výkonu 5 100 W. Z hlediska přesnosti změna výkonu neměla patrný vliv ve sledovaném intervalu. Při sledování vlivu tlaku použitého plynu nejnižší hodnoty Ra dosáhl výchozí vzorek při tlaku 8 bar. V případě přesnosti změna tlaku neměla vliv ve sledovaném rozsahu.

Poslední část této diplomové práce byla zaměřena na ekonomiku řezání materiálů EN AW 5754 o tloušťce 3 mm, Cu-ETP o tloušťce 1 mm a S235JRC+N o tloušťce 3 mm. Na základě vstupních parametrů (pořizovací cena laseru, mzda operátora včetně všech odvodů, spotřeba elektrické energie, spotřeba technických plynů, náklady na opravu stroje za rok) byla vypočtena cena za metr řezu a hodinová sazba laseru pro daný materiál. Na základě výpočtů nejvyšší hodinová sazba byla u materiál EN AW 5754 o tloušťce 3 mm a to 1 527,44 $\text{Kč}\cdot\text{h}^{-1}$. Z hlediska ceny za metr řezu nejdražší variantou je řezání materiálu S235JRC+N o tloušťce 3 mm s cenou za metr řezu 3,51 $\text{Kč}\cdot\text{m}^{-1}$.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. In: *LAO - lasery a optika* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
 2. KUSALA, Jaroslav. LASER A JEHO VYUŽITÍ. In: *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k31.htm>
 3. Jaké Materiály Nelze Řezat Laserovými Řezacími Stroji?. In: *Výrobce inteligentního laserového zařízení - AccTek Laser* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.accteklaser.com/cs/jake-materialy-nelze-rezat-laserovymi-rezacimi-stroji/>
 4. KEREČANINOVÁ, Zuzana a Jaroslav ŘASA. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. In: *MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>
 5. Nekonvenční technologie obrábění. In: *Studijni-svet.cz* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://studijni-svet.cz/nekonvencni-technologie-obrabeni-technologie/>
 6. Fyzikální a chemické metody obrábění. In: *Elektronická učebnice - ELUC* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1397#>
 7. 11 – Nekonvenční metody obrábění. In: *ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/dvorak/cvika/leto/cv_11/cv_11-nekonvencni_metody_studenti.pdf
 8. KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (LASER CUTTING). In: *LAO - lasery a optika* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
 9. Laserové řezání | TRUMPF. In: *TRUMPF SE + Co. KG | TRUMPF* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/aplikace/laserove-rezani/
 10. 2D laserové řezací stroje | TRUMPF. In: *TRUMPF SE + Co. KG | TRUMPF* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/2d-laserove-rezaci-stroje/
 11. Jaké Typy Materiálů Lze Řezat Laserem?. In: *Výrobce inteligentního laserového zařízení - AccTek Laser* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.accteklaser.com/cs/jake-druhy-materialu-mohou-rezat-laserem/>
 12. KUSALA, Jaroslav. OBJEV A OBJEVITELÉ. In: *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap1.htm>
 13. KUSALA, Jaroslav. JAK FUNGUJE LASER. In: *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap2.htm>
 14. HUBERT, Michael. Obrábění laserem pro všechna odvětví. In: *MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-laserem-pro-vsechna-odvetvi>
 15. Obrábění laserem. In: *Elektronická učebnice - ELUC* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1423>
-

16. OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění* [PDF]. 2012.
17. KUSALA, Jaroslav. Princip laseru. In: *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
18. Laserové diody. In: *Elektrorevue* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
19. KUSALA, Jaroslav. Zdroje světla. In: *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k21.htm>
20. Co rozhoduje při volbě typu laseru. In: *MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru>
21. Elektromagnetické spektrum. In: *WikiSkripta* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum
22. DUŠEK, Jiří. Zelené a UV lasery. In: *Megablog - Buďte v obraze. Mluvte s námi.* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>
23. KREJZLÍK, Václav. Laserové řezání nekovových materiálů. In: *MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-rezani-nekovovych-materialu>
24. Laser Safety Knowledge. In: *LaserTo* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.laserto.com/laser-safety-knowledge/>
25. Řezání Laserem. In: *Kovovýroba - Toro Tech S.r.o.* [online]. c2015-2022 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://torotech.cz/rezani-laserem/>
26. ŠPLÍCHAL, Jan. Dělení materiálů laserovým paprskem je stále na vzestupu zájmu. In: *Konstrukce.cz* [online]. c2002-2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/deleni-materialu-laserovym-paprskem-je-stale-na-vzestupu-zajmu-591>
27. MRŇA, Libor. Technologie využívající laser. In: *ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techniky_2013_mrna.pdf
28. KUSALA, Jaroslav. Typy laserů. In: *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
29. KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU. In: *LAO - lasery a optika* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
30. Typy laserů. In: *WikiSkripta* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Typy_laser%C5%AF
31. MINAŘÍK, Václav. Technologické lasery. In: *CWS ANB - česká svářečská společnost* [online]. c2006-2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
32. MARTAN, Jiří. Víte, co máte v laserovém stroji za zdroj?. In: *INFOCUBE s.r.o. — Násobíme Vaše vize tisíci* [online]. 2019 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://infocube.cz/cs/vite-co-mate-v-laserovem-stroji-za-zdroj/>

-
33. ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. In: *MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl>
 34. Disk Lasers Enable Application Advancements. In: *Photonics Spectra* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=17863>
 35. PASCHOTTA, Rüdiger. Thin-disk Lasers. In: *RP Photonics AG – the Company* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.html
 36. What is a Thin Disk Laser, and What Advantages Do They Offer?. In: *Home - Solid State Lasers and Laser Diodes from RPMC Lasers Inc* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.rpmclasers.com/blog/what-is-a-thin-disk-laser-and-what-advantages-do-they-offer/>
 37. Princip vláknového - FIBER LASERU. In: *Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. c2002-2022 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
 38. Možné dělení typů a druhů laserů. In: *Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. c2002-2022 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
 39. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. In: *MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi>
 40. KUSALA, Jaroslav. Konstrukce laserů. In: *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/f4.htm>
 41. What is a Gas Laser?. In: *GoPhotonics* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.gophotonics.com/community/what-is-a-gas-laser>
 42. PASCHOTTA, Rüdiger. CO2 Lasers. In: *RP Photonics AG – the Company* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/co2_lasers.html
 43. LASER: supernástroj člověka 21. století. In: *Akademie věd České republiky* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://www.avcr.cz/export/sites/avcr.cz/.content/galerie-souboru/Laser_supernastroj-cloveka-21.-stoleti.pdf
 44. Operační módy laseru. In: *Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. c2002-2022 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/operacni-mody-laseru>
 45. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
 46. Teoretická část. In: *EPubli webová knihovna* [online]. c2011-2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/170/02.html>
 47. Řezání hliníku vláknovým laserem. In: *Lasergraaf* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://lasergraaf.nl/cs/%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-hlin%C3%ADku-vl%C3%A1knov%C3%BDm-laserem/>
 48. Řezačka - laserový řezací stroj Trumpf TruLaser 3030 BE 3,2 kW. In: *Prodej použitých strojů - strojí a průmyslové vybavení - Exapro* [online]. c2004-2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.exapro.cz/trumpf-trulaser-3030-be-32-kw-p230615060/>
-

-
49. Úsporné řezání tenkých i tlustých materiálů. In: *TRUMPF SE + Co. KG | TRUMPF* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_CZ/pdf_cz/TruLaser_CZ_03_2023_A.pdf
 50. Trumpf TruLaser 3030 (2006) 4,000 Watt CO2 Laser. In: *Machine Sales Revolutionized | Machine Hub* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://machinehub.com/listings/256828-trumpf-trulaser-3030-2006-4-000-watt-co2-laser>
 51. Hi – tech vláknový laser DURMA. In: *Formetal - Plechotvářecí stroje* [online]. 2023 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.formetal.cz/stroje/vlaknovy-laser/>
 52. Fiber laser cutting machine, laser cutting machine, laser. In: *Tramao* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.tramao.com/ad/63846/fiber-laser-cutting-machine-laser-cutting-machine-laser-machine-laser-durma-hd-f-iii-3015>
 53. Ohraňovací lis cnc/nc Amada HFT 100/3. In: *Prodej použitých strojů - strojná a průmyslové vybavení - Exapro* [online]. c2004-2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.exapro.cz/amada-hft-1003-p220311093/>
 54. Vakuové samopřisavné manipulátory. In: *Vakuové manipulátory samonasávací, Klaner systems* [online]. 2007 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.klaner.biz/save/prospekt.pdf>
 55. Manipulační systémy. In: *Tesort - Vázací a manipulační prostředky* [online]. 2016 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://www.tesort.cz/upload/files/Eshop/Categories/32/manipulacni_systemy.pdf
 56. Otočné jeřáby. In: *Jeřáby a zdvihací technika | iteco.cz* [online]. 2017 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.iteco.cz/files/ckeditor/downloads/catalogues/otocne-jeřaby/01-otocne-jeřaby.pdf>
 57. Jeřáby. In: *TEDOX s.r.o. - Dodavatel technického sortimentu* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.tedox.cz/media/cache/file/0d/14-jeřaby.pdf>
 58. Slitina EN AW 5754 (ČSN 42 413, AlMg3). In: *ATREON* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.atreon.cz/slitina-en-aw-5754/>
 59. Almio - Měď. In: *Almio* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.almio.cz/med>
 60. Měď – Materiály a normy. In: *Jaroslav Calta – Barevné kovy a litina* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.bronz-calta.cz/cs/produkty/materialy-a-normy/med>
 61. Měď. In: *Metall-Expres - Hutní výrobky vyrobené z mědi, mosazi, hliníku a nerezové oceli* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://cs.metallexpres.pl/nabidka/med>
 62. Měření drsnosti. In: *M&B Calibr, spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
 63. HANDYSURF Roughness tester 35/40/45. In: *MICROTECH* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://microtech-ua.com/index.php?id_product=11473&controller=product&id_lang=1
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A ₅₀	tažnost pro vzorek s měrnou délkou 50 mm	[%]
E ₀	dolní energetická hladina	[J]
E ₁	horní energetická hladina	[J]
ln	vyhodnocovaná délka	[mm]
m _N	spotřeba hmotnosti dusíku za hodinu	[kg·h ⁻¹]
m _O	spotřeba hmotnosti kyslíku za hodinu	[kg·h ⁻¹]
N _{cena/kg}	cena plynu	[Kč·kg ⁻¹]
N _{cena/kWh}	cena elektřiny	[Kč·kWh ⁻¹]
N _{energie}	cena spotřeby elektrické energie laseru při řezání za hodinu	[Kč·h ⁻¹]
N _{metr}	cena za metr řezu	[Kč·m ⁻¹]
N _{mzda}	hodinová mzda operátora laseru	[Kč·h ⁻¹]
N _{odpis}	odpisy vláknového laseru za hodinu	[Kč·h ⁻¹]
N _{odpis/rok}	roční odpis laseru po dobu deseti let	[Kč]
N _{opravy}	cena oprav za hodinu	[Kč·h ⁻¹]
N _{opravy/rok}	cena za opravy za rok	[Kč]
N _{plyn}	cena spotřeby plynu za hodinu	[Kč·h ⁻¹]
N _{sazba}	hodinová sazba laseru	[Kč·h ⁻¹]
P _p	příkon laseru	[kW]
R _a	střední aritmetická odchylka profilu	[μm]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
R _z	průměrná výška prvků profilu	[μm]
t ₁	čas	[s]
t ₂	čas	[s]
t _{pr/rok}	pracovní hodiny za rok	[h]
v	rychlost řezání	[m·h ⁻¹]

Zkratky

Označení	Legenda
2D	dvourozměrný
3D	trojrozměrný
CNC	počítačem řízený obráběcí stroj
DPSS	lasery buzené laserovými diodami
laser	světlo zesílené stimulovanou emisí záření
LPSS	lasery buzené výbojkami
NC	číslicově řízený

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový list EN AW 5754
Příloha 2 Materiálový list Cu-ETP
-



62-510 KONIN ul. Hutnicza 1
Tel. (063) 247 44 22
(063) 247 44 88
Fax. (063) 247 47 89

INSPECTION CERTIFICATE No **269484/3** Date: 2023-08-03
EN 10204/3.1

ORDER No	0
----------	---

GOODS DESCRIPTION			
Alloy	Batch No	Dimensions [mm]	Temper
EN-AW 5754	269484/3	Thickness	3,000
		Width	1000,00
		Length	2000,00
			H22

CHEMICAL ANALYSIS [%]									
Heat/Melt No	Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Cr	Ti	Zn	Other
23702851	0,355	0,249	0,064	3,193	0,340	0,043	0,023	0,031	

MECHANICAL AND OTHER PROPERTIES					
Slab/Coil No	Rm	R _{p0,2}	A ₅₀	Hardness	Other
	[MPa]	[MPa]	[%]	[HB, V]	
23702851	230	151	21	-	-

Tolerance of dimensions and the shape - positive result

WE HEREBY CERTIFY THAT THE GOODS COMPLY WITH YOUR ORDER AND NORM:

EN485-1,2,4; EN573-3; EN15088



1430-CPR-0032
2021

CENTRAL LABORATORY
Laboratory Foreperson
Waldemar Dobry

TRANSPORT and STORAGE CONDITIONS OF ALUMINIUM STRIPS AND SHEETS BY CUSTOMER
Strips (sheets) should be transported by covered, dry and clean means of transport preserving correct regulation, protecting it from mechanical damage, humidity and harmful environmental factors.
Strips (sheets) should be stored in covered, dry and clean rooms protecting them from humidity and action of active chemicals. Protection of cut edges against mechanical damage should be taken into special attention. Baking face damage can cause difficulties in anodizing process.
The storage temperature room should be stable. Changes of the temperature to such cause that air moisture is condensed on the strip surface, in consequence of capillary action, between coils, packages inside and inducing corrosion.
Disclaimer of above mentioned transport and storage conditions absolves supplier from responsibility for material quality.

Abnahmeprüfzeugnis DIN EN 10204-3.1
Inspection Certificate DIN EN 10204-3.1



KME Mansfeld GmbH
Lichtlöcherberg 40
06333 Hettstedt / Germany
Produktbereiche Bleche / Bänder

Überprüft nach AD 2000-Merkblatt WD/TRD100
durch den TÜV Hannover/Sachsen-Anhalt e.V.
Zertifiziert nach Richtlinie 2014/68/EU durch die
TÜV CERT-Zertifizierungsstelle für Druckgeräte der
TÜV Nord Gruppe, Notifizierte Stelle, Kenn-Nr.: 0045
phone: +493476892474

e-mail: Daniel.Goldstein@kme.com

Datum / Date	24.11.2022
Auftrag/Position / Contract-No./Item	1002155 / 2
Kundenmat.-Nr. / Prod. No. of Customer	
Kundennummer / Customer	115950
Bestellnummer / Order no.	22200476
Produktionsmeldung / Production No.	782573
Abmessung / Dimension	1 x 1000 x 2000 mm
Norm z. Abmessung / dimensional Standard	EN13599/2014
Dicke/thickness	1,000 mm (+/-0,0900 mm)
Breite/width	1.000,000 mm (-0,000 mm/+2,000 mm)
Länge/length	2.000,000 mm (-0,0 mm/+10,0 mm)
Erzeugnis / Product	Sheet
Werkstoff, Norm / Material, Standard	Cu-ETP / EN13599/2014
Festigkeit, Norm / Temper, Standard	R240 / EN13599/2014

Gesamtgewicht / Shipping Units

Netto / net: 2018,00 kg

Chemische und mechanische Eigenschaften / Chemical and mechanical properties

Charge / Batch	X81447
Datum/Probenr/ date/test-no	20221123/2157
Cu min 99,90000 %	99,99416
O max 0,04000 %	0,00060
Pb max 0,00500 %	0,00023
Bi max 0,00050 %	0,00003
Sonst. El. / Other El. excl. Ag, O max 0.030 %	<= 0.030
Min. el. conductivity 57.00 MS/m	> 57.00
Tensile strength Rm 240 - 300 N/qmm	247
Yield strength Rp0,2 min 180 N/qmm	206
Elongation 50 mm min 8 %	36

Die Maß- und Formtoleranzen entsprechen den Bestellvorgaben. Es wird bestätigt, dass die Lieferung geprüft wurde und den Vereinbarungen bei der Bestellanahme entspricht.
The dimensional and shapelolerances conform to the requirements. We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order contract.

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Es ist durch nachstehende Person autorisiert.
This certification report is machine-made.
It is authorized by the undersigned person.

KME Mansfeld GmbH
Daniel Goldstein
Abnahmebeauftragte(r) / Inspection Manager