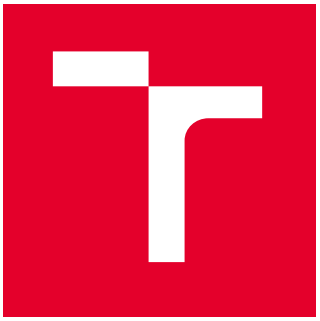


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ LASEROVÝCH STROJŮ PRO GRAVÍROVÁNÍ

USE OF LASER MACHINES FOR ENGRAVING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Vojtěch Bernátek**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Martin Slaný, Ph.D.**

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Vojtěch Bernátek**
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	**Ing. Martin Slaný, Ph.D.**
Akademický rok:	2021/22

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

Využití laserových strojů pro gravírování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Gravírovací proces v moderní podobě se využívá jak ve strojírenském průmyslu, tak i ve spotřebním zboží, i jinde. Nejde jen o popisování a ozdobné ornamenty. Některé typické možnosti rozebírá toto téma.

Cíle diplomové práce:

– Principy procesu gravírování v současné době (včetně krátké historie).
– Charakteristika strojů dostupných na světovém trhu.
– Vhodné výrobky (předměty) pro gravírování.
– Porovnání s tradičními řemeslnými procesy.
– Zvolený vzorový výrobek.
– Kompletace provozních dat pro etapu výroby prototypu.
– Zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

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

FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 1996. 262 s. ISBN 80-85867-95-8.

KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. 3. vyd. Olomučany: CERM, s. r. o., 2007. 170 s. ISBN 978-80-241-3380-9.

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

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

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

MICHNA, Štefan et al. Encyklopedie hliníku. 1. vyd. Prešov: Adin, 2005. 700 s. ISBN 80-89041-88-4.

PATŘIČNÝ, Martin. Dřevo krásných stromů. 3. vyd. Praha: Grada, 2005. 144 s. ISBN 978-80-247-1193-5.

PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.

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

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

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

SUCHY, Ivana. Handbook of die design. 2nd edition. New York: McGRAW-HILL, 2006. P. 730. ISBN 0-07-146271-6.

ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se věnuje laserovým strojům pro gravírování. Teoretická část se zabývá laserovou technologií a laserovým gravírováním obecně. Zmíněna je historie, konkrétně vývoj a vzestup laseru, gravírování i laserové gravírování, dále charakteristika laserových strojů pro gravírování, popis jejich částí a principu laserové technologie jako takové. Práce zmiňuje vhodné předměty a materiály pro laserové gravírování a také nabízí porovnání laserového gravírování s dalšími tradičními metodami mikroobrábění nebo úpravy povrchu. Praktickým cílem bylo zjistit korekce na laserovém stroji používaném ke gravírování, které vznikají při používání metody swing. Tato metoda uživateli primárně šetří čas samotného procesu gravírování, ale bez korekcí u ní vznikají nepřesnosti vlivem kinematiky a dynamiky stroje. Zjištěné korekce byly vyneseny do grafu a následně byl za použití korekcí vygravírován vzorový výrobek.

Klíčová slova

gravírování, laserová technologie, laserové stroje, laserové gravírování, korekce

ABSTRACT

The diploma thesis covers laser engraving machines topic. In the theoretical part, it briefly covers laser technology and laser engraving in general. It also mentions history of laser engraving, especially rise and development of the laser itself, laser engraving, as well as characteristics of laser engraving machines. A description of laser engraving machines parts and the working principles of laser technology as such are also included. All objects and materials suitable for laser engraving are also described is the thesis. Furthermore, comparison of laser engraving and other traditional methods of micro machining or surface treatment in general is depicted. In the practical part, thesis deals with the goal of finding the exact corrections on the laser engraving machine necessary to be made when using swing method. Major advantage of this method is its time saving ability during the engraving process, but the corrections mentioned above are needed as inaccuracies emerge due to the kinematics and dynamics of the machine. Last, but not least, ascertained corrections were plotted into a graph and a sample product was engraved using the corrections found.

Key words

engraving, laser technology, laser machines, laser engraving, correction

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BERNÁTEK, Vojtěch. *Využití laserových strojů pro gravírování* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140325. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Martin Slaný.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Využití laserových strojů pro gravírování vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Vojtěch Bernátek

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doktorovi Slanému za cenné připomínky, rady a za jeho čas, který mi věnoval při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD 9
1 TEORETICKÁ ČÁST 10
1.1 Historie 10
1.1.1 Počátky gravírování 10
1.1.2 Historie laseru 10
1.1.3 Vzestup laserového gravírování 11
1.2 Laser 11
1.2.1 Základní části laserového zařízení 12
1.2.2 Princip metody 14
1.2.3 Vlastnosti paprsku laseru 15
1.2.4 Mód – příčné rozložení intenzity záření 16
1.2.5 Základní rozdělení laserů 18
1.2.6 Pevnolátkové lasery 19
1.2.7 Absorpce laserového záření materiálem 22
1.3 Laserové gravírování 23
1.3.1 Interakce laserového paprsku s materiálem 25
1.3.2 Paprsek laseru 28
1.3.3 Pulsy laseru 29
1.3.4 Základní materiály vhodné pro gravírování 30
1.3.5 Parametry laseru 31
1.3.6 Porovnání s jinými procesy 32
1.3.7 Stroje pro laserové gravírování 34
2 PRAKTICKÁ ČÁST 36
2.1 Souhrn používaných strojů, materiálu a pomůcek 36
2.2 Příprava a gravírování vzorků k měření 38
2.3 Měření vzorků 39
2.3.1 Měření šířky a výšky bodů 40
2.3.2 Měření korekcí 45
2.4 Zhodnocení gravírovaného vzorku 57
3 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ 58
ZÁVĚR 61
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 62
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 65

ÚVOD

Cílem této diplomové práce bylo rozebrat téma využití laserových strojů pro gravírování. Laser patří do nekonvenčních technologií výroby a laserový paprsek je bezkontaktní nástroj, u kterého nejsou rozhodující mechanické vlastnosti obráběného materiálu, takže lze využít k obrábění téměř jakéhokoliv materiálu. Laserové gravírování je jen jednou z možností, jak se gravíruje a nejčastěji se používá pro označování a popisování výrobků. Podstatou laserového gravírování je odebrání tenké vrstvy materiálu zasaženého paprskem laseru. Častým účelem gravírování je spíše vizuální dojem než přesnost a množství odebraného materiálu.

Tato práce je rozdělena na tři hlavní části. První částí je obecná teorie. Hned na úvod je zde pohled do historie. Je možné se dočíst o průběhu vynálezu laserového paprsku a následné počátky jeho využívání. Dále je věnovaná pozornost historii procesu gravírování a také jsou zde zmíněny počátky a vzestup laserového gravírování. Následně je podrobně rozebrána laserová technologie, její hlavní parametry a princip metody. Teoretickou část zakončuje rozbor laserového gravírování. Je zde popsán princip laserového gravírování, charakterizovány stroje určené pro laserové gravírování, definovány základní vhodné materiály a výrobky pro laserové gravírování a v poslední řadě je zde porovnání s jinými řemeslnými a strojírenskými způsoby mikroobrábění a úpravy povrchu.

Praktická část se věnuje kompletaci provozních dat pro výrobu zvoleného vzorového výrobku. U tohoto výrobku byla použita metoda swing, kdy laserová hlava gravíruje v obou směrech osy x. Tato metoda je oproti metodě unilateralism, která gravíruje pouze v jednou směru osy x, časově méně náročná, ale vlivem kinematiky a dynamiky stroje u ní vznikají nepřesnosti. Kompletace provozních dat byla ve znamení získání korekcí, které jsou do systému zaváděny a mají za účel eliminovat zmíněné nepřesnosti. Na vzorovém výrobku byly následně gravírované tři stejné vzory třemi různými způsoby, a to metodou unilateralism, metodou swing se získanými korekcemi a metodou swing bez korekcí. Následně byl tento vzorový výrobek vizuálně zhodnocen.

Poslední část diplomové práce bylo technicko-ekonomické zhodnocení. Pro tuto část byla definována hypotetická zakázka a následně bylo porovnáno, jak se budou lišit nákladové položky při zhotovení zakázky metodou swing a metodou unilateralism.

1 TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části této diplomové práce je krátce na úvod věnovaná pozornost historii, kdy jsou rozebrány počátky procesu gravírování, vynález laseru a jeho první pokusy o používání a následně vzestup technologie laserového gravírování. Dále je v teoretické části obsáhlá kapitola, která má za účel systematicky představit obecně laserovou technologii. Je zde věnovaná pozornost principu technologie, uvedeny jsou zde základní typy laserů a jejich charakteristika a popis absorpce laserového paprsku materiálem. Na závěr v teoretické části diplomové práce je rozebrána teorie laserového gravírování. Podrobněji je zde věnovaná pozornost interakci laserového paprsku s materiálem, jakou charakteristiku má odběr materiálu při procesu laserového gravírování, vhodné materiály pro laserové gravírování nebo popis vybraných laserových strojů pro gravírování.

1.1 Historie

Gravírování je technologie, která nahrazuje ruční rytí a vytváří se jí většinou nápis, logo, či ornament při odebráním materiálu. Původní rytci pracovali s rydly a čakany a nápisy byly také následně zvýrazňovány různými kovy jako například cínem, zlatem, stříbrem nebo mědí. Dříve rytci, kromě nápisů například na náhrobní kameny, vytvářeli ornamenty nebo erby. Později byla práce rytců směrována na výrobu informačních a reklamních tabulí, tiskařských štočků a různých razidel. [1]

Laser lze jednoduše charakterizovat jako úzký paprsek světla. V dnešní době mají lasery své neodmyslitelné místo v průmyslové výrobě, ale musely si za svou dobu existence projít dlouhou cestu vývojem od drahých a málo používaných zařízení po dnešní sofistikované a téměř nenahraditelné přístroje.

1.1.1 Počátky gravírování

Od počátku bylo gravírování používáno především jako umělecké vyjádření lidské rasy. Mezi první případy gravírování se počítá vytesaná skořápka, pocházející z období 540 000 až 430 000 př.n.l. z Trinilu v Indonésii, kde byl také objeven první Homo erectus. Další náznaky gravírování byly nalezeny na pštrosích vejcích používaných jako nádoby na vodu nalezených v Jižní Africe z doby okolo roku 60 000 př. n. l. Rytí do kosti a slonoviny bylo používanou technikou pro umění horního paleolitu. Větší ryté petroglyfy na skalách byly nalezeny z období mnoha prehistorických kultur po celém světě. [1; 2]

Z období starověku máme k dispozici spoustu nálezů rytin v měkkých kovech používaných zejména jako šperky již z počátku 1. tisíciletí př.n.l. Od prvního století našeho letopočtu se také poprvé objevuje gravírování skla. Účel gravírování skla byl opět dekorativní. [1; 2]

V období středověku gravírování stále plnilo zejména dekorativní funkci. Postupně se však od této metody upouštělo a nahradila ji metoda leptání, která byla v porovnání s gravírováním snazší na provedení. [1; 2]

V polovině 20. století postupně začala nastávat renesance ručního rytí. S vynálezy pneumatických systémů ručního rytí, které pomáhaly ručním rytcům, se umění a techniky ruční rytiny stali dostupnějšími. [1; 2]

1.1.2 Historie laseru

Poprvé princip laseru popsal už Albert Einstein v roce 1917. Za předchůdce laseru se považuje systém maser, který pracuje díky stejnému principu – stimulovaná emise, generuje však mikrovlnné záření. Maser jako první představili Charles Townes, J. P. Gordon a H. J. Zeiger v roce 1953. Jejich prototyp nebyl ale schopný fungovat bez přerušení. Tento průlomový

prototyp je vedl k tomu, že v roce 1958 navrhli vytvoření pokročilejší formy technologie, kterou nazvali laser nebo zesílení světla stimulovanou emisí záření. Dvojice pak napsala vědeckou práci, která nastínila její teoretické fungování, což pomohlo inspirovat řadu vědců. [3; 4]

V roce 1958 však Gordon Gould také začal pracovat na laseru a historici ho dnes často připisují jako vynálezce původního laserového světla. Gould ale nebyl schopen zajistit patent na své zařízení včas, což vedlo k zamítnutí tohoto patentu a dalo příležitost dalším společnostem a vědcům. Gould nakonec obdržel opožděný patent až v roce 1977. [3; 4]

V roce 1960 vynalezl Theodore Maiman laser, považovaný za první životaschopný optický laser, který existuje. Jako aktivní prostředí použil krystal rubínu s využitím tří energetických hladin. Laser proto mohl pracovat pouze v pulsním režimu. [3; 4]

Fokusované CO_2 laserové paprsky pro laserové řezání byly poprvé představeny v roce 1967, přičemž výzkumníci z Boeingu vedli v následujících letech vývoj této technologie, což v roce 1975 vedlo k moderní CO_2 laserové řezačce. [3; 4]

Všechny tyto pokroky se promítly do historie laserového gravírování, a nakonec vydláždily cestu pro systémy laserového značení a laserového gravírování, které byly vyvinuty a začleněny do široké škály průmyslových odvětví. [3; 4]

1.1.3 Vzestup laserového gravírování

S neustálým pokrokem v technologii začaly být lasery schopny označovat nebo gravírovat materiály pro vytváření čárových kódů, sériových čísel, 2D kódů, log, designů a dalších. [5]

V 70. letech 20. století ve snaze zlepšit tehdy populární počítačové gravírovací stroje začal Bill Lawson experimentovat se životaschopností a možnostmi laserového gravírování. Před Lawsonem vyvinula společnost Laser Craft některé primitivní technologie laserového gravírování, ale jejich systémy vyžadovaly použití šablon a ve skutečnosti materiál „pískovaly“ laserovým paprskem. Tyto šablony bylo také obtížné ovládat. Systém, který Lawson použil, naskenoval černobílé kresby a vyryl buď bílou nebo černou část, v závislosti na přání operátora. To mělo za následek zlepšení konečného výsledku. [5]

Během 70. let 20. století byl Electrox první laserová společnost, která vyvinula a vyrobila komerční CO_2 laser s rychlým axiálním tokem, což ustanovilo Electrox na pozici jedničky mezi systémy laserového značení. [5]

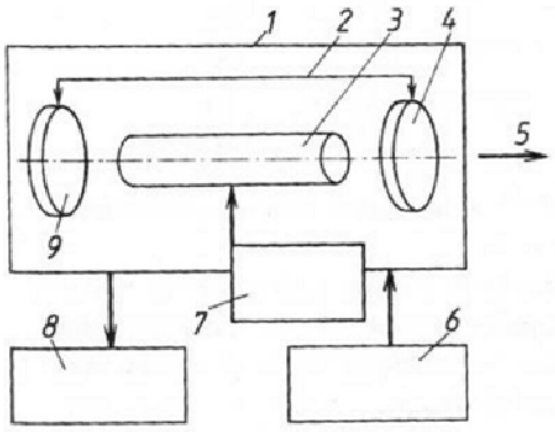
Technologie a konkrétně počítačové systémy výrazně pokročily v 80. a 90. letech 20. století, což vedlo k přímé integraci počítačů do systémů laserového gravírování. Tyto pokroky pak vedly k poklesu ceny, díky čemuž byly laserové systémy hospodárnější než kdykoliv předtím. Zatímco mnoho společností již dříve vidělo hodnotu v laserové technologii, byla problémem cena systémů. Moderní systémy z 90. let a dále tento problém odstranily a byly pro mnoho provozů praktičtější investicí. [5]

1.2 Laser

Laser lze zjednodušeně charakterizovat jako soustředěný paprsek světla. V dnešní době našly lasery široké využití v průmyslové výrobě a často tvoří její nepostradatelnou součást. Laser dosahuje obecně velmi kvalitních výsledků, což je bohužel často vyváženo jeho vyšší pořizovací cenou. Laser je poměrně komplikované zařízení, a proto trvalo určitou dobu, než došlo k jeho prvnímu využívání. Princip obrábění a opracovávání materiálů za použití laseru spočívá na přeměně světelné energie na energii tepelnou. Slovo laser se skládá z počátečních písmen anglického názvu popisující jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, do češtiny přeloženo jako zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise

záření. V dnešní době jsou lasery v průmyslové výrobě široce zastoupeny a často jsou její nepostradatelnou součástí. [4; 6]

1.2.1 Základní části laserového zařízení



1 - laserová hlavice
2 - rezonátor
3 - laserové médium
4 - polopropustné zrcadlo
5 - výstup paprsku
6 - zdroj energie buzení
7 - budicí zařízení
8 - chladicí systém
9 - nepropustné zrcadlo

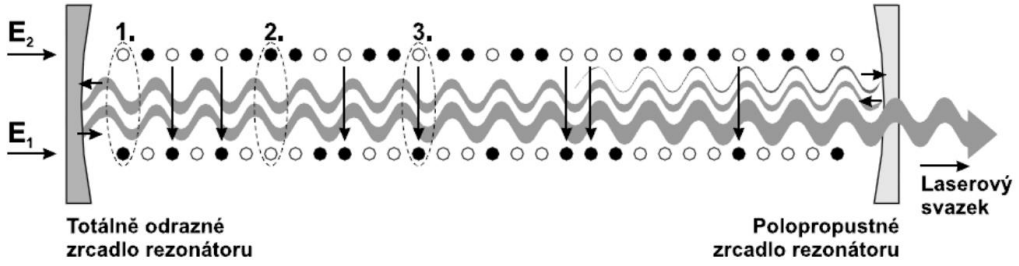
Obr. 1 Schéma zařízení pro obrábění laserem [6]

Součástí každého laseru je laserová hlavice (viz obr. 1) která se skládá z dalších částí. Tyto a další části jsou podrobně popsány v následujících odstavcích.

Aktivní prostředí definuje jedno ze základních rozdělní laserů na pevnolátkové, kapalné a plynné. Tato část je schopna zesilovat záření, které zařízením prochází díky stimulované emisi. Látka, která tvoří tuto část musí mít následující vlastnosti. Musí být průhledná a schopná odvádět teplo vzniklé ze záření. Jednou z charakteristik laserového paprsku je vlnová délka. Ta je právě určena druhem aktivního prostředí. První funkční laser měl aktivní prostředí tvořené krystalem rubínu. V dnešní době se používá velké množství látek všech skupenství. To odlišuje jednotlivé lasery a určuje jejich využití. [6]

Laserové médium určuje délku vlny záření. Jedná se o směs vícero materiálů se vhodnými energetickými hladinami v nosném průhledném materiálu, jehož schopnost je odvádět vzniklé teplo. Laserové médium může být pevné, tekuté nebo plynné. [6]

Rezonátor (zobrazený na obr. 2) je optický systém, díky kterému se zformuje a zesílí záření, tedy elektromagnetická vlna, která z něj vychází. Vlastnosti paprsku (koherenci, intenzitu záření, jeho pravidelnost, spektrální a prostorové charakteristiky) určuje konstrukční uspořádání rezonátoru. Optický rezonátor se skládá z nejméně dvou zrcadel. Nejčastěji používané jsou sférická zrcadla ve konfokálním stabilním nebo konfokálním nestabilním uspořádání. Rozdělení intenzity záření a energetická rozbíhavost laserového záření je určena průměrem a zakřivením zrcadel. Rozdělení intenzity záření v průřezu výstupního paprsku laseru vyjadřuje tzv. mód, tedy označení pro vlastní kmity elektromagnetického pole v rezonátoru, charakterizované danou frekvencí a zvláštnostmi rozložení pole v rezonátoru. [6]

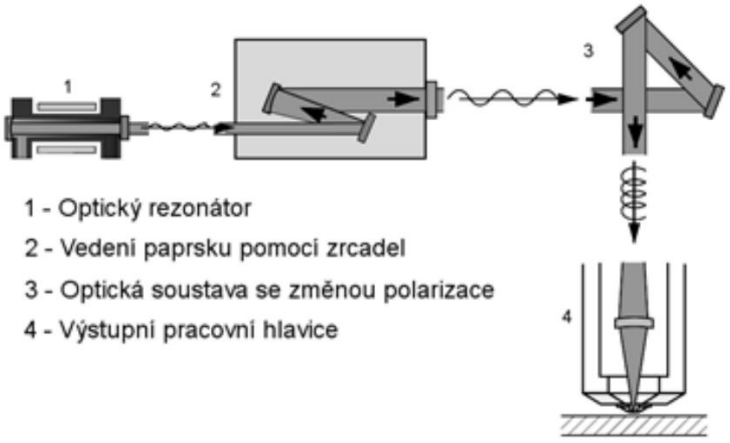


Obr. 2 Optický rezonátor [8].

Budicí zařízení je část ovlivňující pracovní režim laseru. Způsob buzení určuje laserové médium. Plynné médium je buzeno téměř výhradně elektrickým výbojem, stejnosměrným nebo střídavým proudem. Pevné laserové médium je ve většině případů buzeno lampami (výbojkami) nebo diodami. U laserů s plynným aktivním prostředím dochází k buzení nejčastěji elektrickým výbojem, střídavým nebo stejnosměrným proudem, ale existují i další způsoby buzení. [6; 9]

Zdroj energie buzení, což je speciální druh síťového napáječe. Tato část laseru má za úkol vyvolat excitaci aktivního prostředí. [6; 10]

Chladicí systém má za úkol odvádět nevyužitou energii, jež není přeměněna v záření, ale v tepelnou energii. Nejčastěji se používá chlazení vodou. Chladicí okruh má dvě větve, což jsou vnitřní (používá se deionizovaná voda) a vnější (voda z vodovodní sítě nebo ze speciálního zásobníku pomocí vlastního čerpadla). Výrobci laserových zařízení dodávají také speciální chladicí zařízení, u kterých se používá vnitřní okruh chlazen vzduchem. [6]



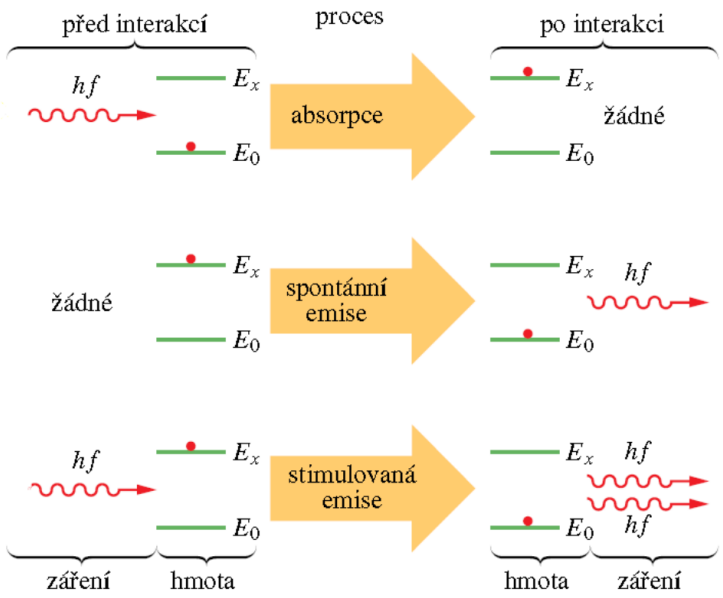
Obr. 3 Vedení laserového paprsku pomocí zrcadel [11].

Vedení laserového paprsku (zobrazeno na obr. 3) je část systému, která zajišťuje přenos a úpravu paprsku z aktivního prostředí až do výstupní hlavy. Jednou z variant pro přenos paprsku je soustava zrcadel a čoček, což je varianta často využívána pro 2D aplikace (např. řezání plechů). Pro další variantu přenosu laserového paprsku se používá optické vlákno, což je varianta vhodná pro přenos paprsku s využitím u průmyslových robotů. Paprsek je zde přiváděn do libovolné polohy výstupní hlavy, která je umístěna na konci ramene průmyslového robota. [6; 9; 11]

1.2.2 Princip metody

Laser pracuje s principem indukované emise, tedy vynuceného záření. Indukovaná emise je způsobena dopadem záření na atom prvku, kdy záření nutí elektron obíhající kolem jádra přijmout energii a tím vstoupit na vyšší oběžnou dráhu. Dodatečný příjem energie a rovnováha sil v atomu donutí elektron vrátit se na svou původní oběžnou dráhu a vyzářit dodanou energii do prostoru. Výsledné záření je monochromatické (tj. má přesně definovanou vlnovou délku) a koherentní, to znamená, že příslušné částice (fotony) se ve svazku pohybují pouze jedním směrem a jsou v jeho průřezu buď stejnoměrně nebo alespoň velmi pravidelně rozděleny. [6]

Aktivní prostředí je základním prvkem každého laseru. V něm vzniká a souběžně se zesiluje záření díky stimulované emisi, což je jev, který za daných podmínek vzniká po interakci fotonu s atomem. Mezi další jevy patří absorpce a spontánní emise. Tyto jevy si podrobněji popíšeme v následujících odstavcích a na obr. 4 jsou tyto jevy znázorněny na energetických hladinách s energií $\mathbf{E_0}$ a $\mathbf{E_x}$. Elektromagnetické záření značíme jako $\mathbf{h_f}$, kde **h** je Planckova konstanta a **f** frekvence elektromagnetického záření. Energii dodává budící zařízení. [9; 12; 13]



Obr. 4 Princip vzniku laserového paprsku [12].

Absorpce – V aktivním prostředí se atom nachází v základním stavu s minimální energií $\mathbf{E_0}$ (na hladině 1) a zde zůstává. Když je atomu dodána energie $\mathbf{E_x}$ (hladina 2) díky fotonu neboli elektromagnetickým zářením určité frekvence, tak foton odevzdá svojí energii atomu a ten se dostává na hladinu 2 a zde setrvá určitou dobu, což je doba životnosti excitovaného atomu. [9; 12; 13]

Spontánní emise – Jakmile uplyne doba, kdy atom může setrvat v excitovaném stavu (obvykle se tato doba pohybuje okolo 10^{-8} s), tak se atom vrátí do počátečního základního stavu $\mathbf{E_0}$. Podmínkou, aby se atom dostal z energetické hladiny 2 zpět na hladinu 1 je nutné, aby uvolnil svou energii. Při spontánní emisi má záření fotonů různou vlnovou délku, fázi i amplitudu. Takovéto záření je nemonochromatické s malou intenzitou. [9; 12]

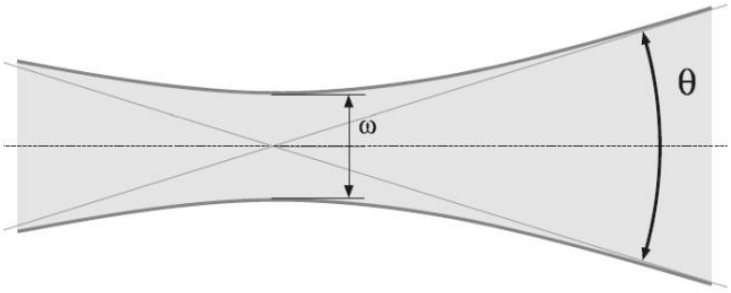
Stimulovaná emise – Jakmile atom absorbuje energii $\mathbf{E_x}$, bude se nacházet na energetické hladině 2 a bude moct nastat stimulovaná emise. Podmínkou k tomuto jevu je nutnost excitovaný atom zasáhnout fotonem. Foton musí mít energii rovnající se rozdílu $\mathbf{E_x - E_0}$, pak atom sestoupí na energetickou hladinu 1 a také se vyzáří další foton, což je považováno za zesílení záření. Foton, který dopadá na atom, i poté vzniklý foton mají stejnou frekvenci, fázi

a šíří se stejným směrem. Stimulovaná emise je podstatou zesílení záření. Během toho narůstá počet fotonů, které se šíří v jednom směru. Aby bylo zaručeno zesílení laserového paprsku v určitém směru, je používán optický rezonátor, který způsobuje šíření pouze těch fotonů, co se pohybují rovnoběžně s osou optického rezonátoru. [9; 12]

1.2.3 Vlastnosti paprsku laseru

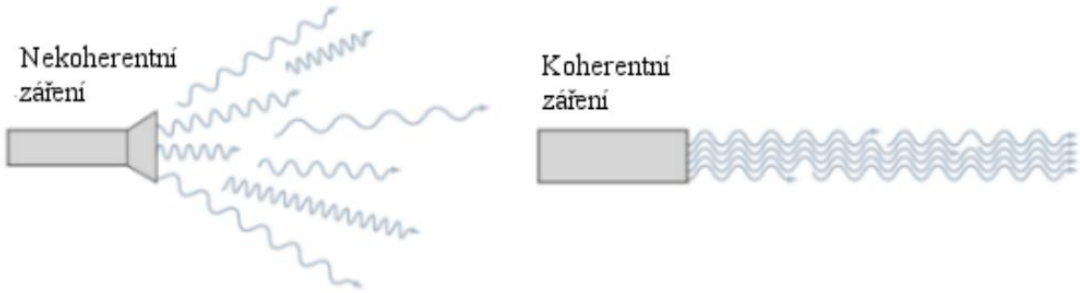
Jedinečné vlastnosti laserového paprsku jsou právě tím důvodem, že jsou lasery v tak širokém spektru využívány. Fokusace na velmi malou plochu je jeho hlavní výhodou a díky tomu může mít vysokou hustotu energie až 10^9 $W \cdot cm^{-2}$. V pulzním režimu je to dokonce i více. Dále v jednotlivých odstavcích jsou uvedeny základní vlastnosti paprsku. [9]

Divergence (viz obr. 5) – Může se označovat i jako rozbíhavost. Díky malé rozbíhavosti můžeme docílit fokusace laserového paprsku na velmi malou plochu. S tím souvisí vlnová délka paprsku. Obecně platí, že s kratší vlnovou délkou můžeme paprsek laseru zaostřit na menší plochu. Důležité parametry, se kterýma pracujeme jsou průměr zaostřeného paprsku **ω** (nejužší místo) a úhel rozbíhavosti paprsku **Θ**. [9; 11]



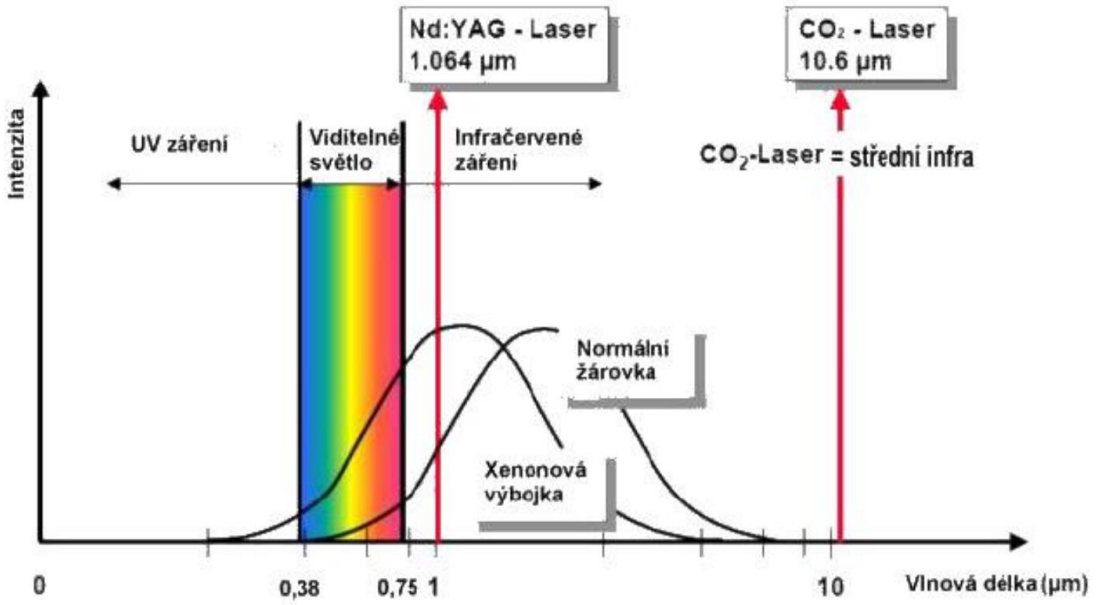
Obr. 5 Divergence paprsku [11].

Koherence – Záření, které vychází z laseru by mělo mít v určitém okamžiku a na daném místě stejnou vlnovou délku, směr a fázový posun. Rozdíl mezi koherentním a nekoherentním zářením je zobrazen na obr. 6. [9; 14]



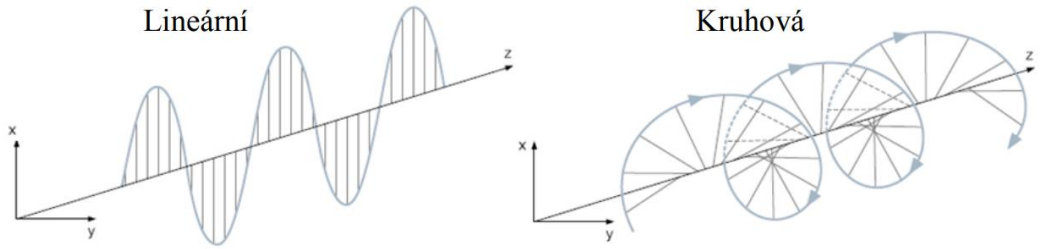
Obr. 6 Rozdíl mezi nekoherentním a koherentním zářením [14].

Monochomatičnost (viz obr. 7) – Podstata stimulované emise je eliminace stejných fotonů, což je důvod, proč má laserový paprsek jednu vlnovou délku. Na rozdíl od laseru například xenonové výbojky, běžné žárovky a jiných zdrojů světla pracujích v širokém spektru vlnových délek. [9; 15]



Obr. 7 Elektromagnetické záření s různými zdroji světla [15].

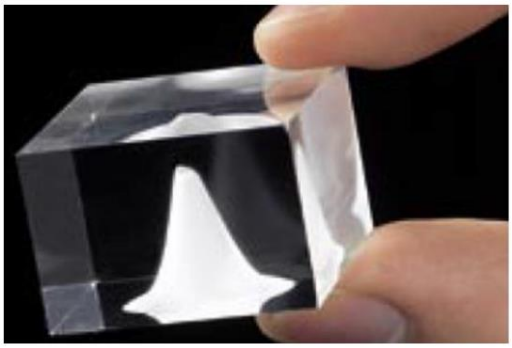
Polarizace (viz obr. 8) – Světlo je viditelná část elektromagnetického vlnění. V případě, že vektor tohoto vlnění kmitá v jedné rovině, tak se jedná o lineárně polarizované světlo. Ostatní běžné zdroje světla bývají z pravidla nepolarizované, laserový paprsek však dokáže být lineárně nebo dokonce kruhově polarizovaný. Nejvhodnější polarizace pro univerzální použití laseru je polarizace kruhová. [12; 16]



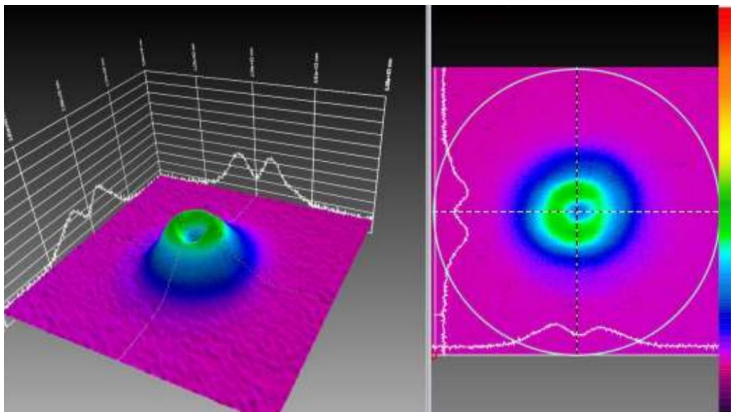
Obr. 8 Lineární a kruhová polarizace. [12]

1.2.4 Mód – příčné rozložení intenzity záření

Rozložení intenzity laserového paprsku v příčném a podélném směru se označuje jako TEM (transverse elektromagnetic mode). Tvar a rozložení intenzity záření určují jednotlivé optické komponenty, a hlavně geometrická konstrukce optického rezonátoru. Základním parametrem pro mnoho aplikací je dobře nastavené symetrie módu. Konkrétní podobu módu určujeme dvěma způsoby. První způsob je pomocí speciálního plexiskla, kdy na toto plexisklo zářímе nefokusovaným laserovým paprskem a mód se v něm projeví (viz obr. 9). Další možnost zjištění módu je díky speciálnímu zařízení, které dokáže charakteristický tvar intenzity záření přenést do počítače (viz obr. 10). [6; 11; 13]

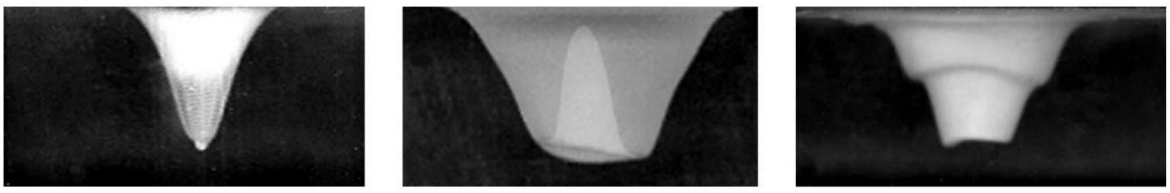


Obr. 9 Mód zobrazený v plexiskle [16].



Obr. 10 Mód zobrazený pomocí PC – vyhovující symetrie [15].

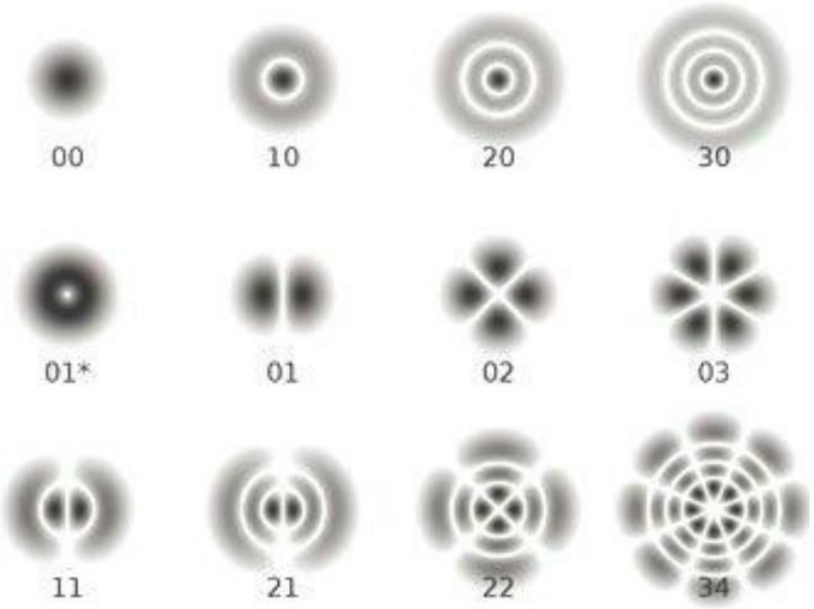
TEM_{00} je označení pro základní mód a jeho tvar kopíruje Gaussovu rozložení, vyznačuje se nejvyšší intenzitou záření na ose paprsku a čím dál od osy se paprsek nachází, tím menší je jeho intenzita. TEM_{00} je nejčastěji používán při řezání. Jiný mód označován TEM_{01} má část stejnou jako je Gaussovo rozložení, jen intenzita paprsku v určité vzdálenosti od osy paprsku a v ose paprsku je nulová. Mód TEM_{01} je vhodný pro povrchové úpravy, vrtání nebo i pro řezání. Existuje mnoho dalších módů s různým rozložením intenzity v paprsku (multi mode). Mezi další určující parametry paprsku patří číslo K, které se pohybuje v hodnotách od 0 do 1 nebo převrácená hodnota k M^2 parametru. Tyto módy jsou zobrazeny na obr. 11. [6; 11; 15]



TEM_{00} (K=0,9) TEM_{01} (K=0,6) Multi mode (K=0,25)

Obr. 11 Druhy rozložení intenzity v laserovém paprsku [11].

Současně se v rezonátoru může vybudit velké množství různých módů oscilace, které se od sebe liší frekvencí a amplitudou. Tím se zmenšuje spektrální čistota, koherentní záření a zvyšuje se rozbíhavost paprsku (viz obr. 12). Zhoršením těchto vlastností se zhorší kvalita systému, v kterém se používají lasery. [17]



Obr. 12 Příklad dalších módů TEM [18].

1.2.5 Základní rozdělení laserů

Laserové systému mohou být rozdělovány podle různých pohledů, mezi základní dělení patří:

- Rozdělení podle aktivního prostředí (toto rozdělení bývá nejpoužívanější) [6; 19]:
  - pevnolátkové:
    - tyčové,
    - vláknové,
    - diskové,
    - polovodičové,
  - plynové,
  - kapalinové,
  - plazmatické.
- Rozdělení podle vysílaných vlnových délek optického záření:
  - infračervené,
  - vlnové délky viditelného pásma,
  - ultrafialové,
  - rentgenové.
- Rozdělení podle typu kvantových přechodů (energetických hladin):
  - molekulární:
    - rotační,
    - rotačně-vibrační,
    - vibrační,

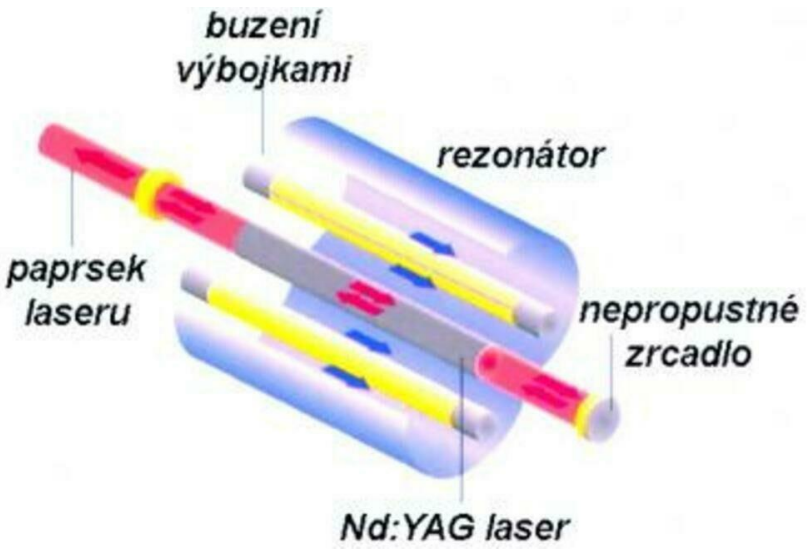
  - elektronové,
  - jaderné.
- Rozdělení podle typu buzení:
  - optické buzení,
  - buzení elektrickým výbojem,
  - buzení elektronovým svazkem,
  - buzení tepelnými změnami,
  - buzení chemicky, rekombinací nebo injekcí nosičů náboje.
- Rozdělení podle časového režimu provozu laseru:
  - impulzní,
  - kontinuální.
- Rozdělení podle délky generovaného pulzu:
  - s dlouhými pulzy,
  - s krátkými pulzy,
  - s velmi krátkými pulzy (pikosekundové až nanosekundové).

1.2.6 Pevnolátkové lasery

Dielektrikum, tedy pevná a opticky propustná látka, je aktivním prostředím pevnolátkových laserů. Nejčastěji se jedná o krystaly, oxidy, sklo a granáty. Základním materiálem je u pevnolátkových laserů matrice. Ta určuje většinu technických vlastností daného krystalu, musí být průzračná, opticky homogenní a musí být technologicky možné ji uměle vyrábět. Buzení u pevnolátkových laserů je nejčastěji optické. V poslední několika letech vznikají lasery s vysokou kvalitou paprsku, což je způsobeno účinným chlazením aktivního prostředí. Například vláknový laser je chlazený po celé délce optického vlákna. V aktivním prostředí je důležité udržet konstantní teplotu, jinak by mohlo dojít ke generování laserového záření s odlišnými vlastnostmi. Podstatou moderních laserů je kvalitní chlazení. [6; 14; 20; 21]

Rubínový laser – Krystal je aktivním prostředím. Generuje záření o vlnové délce 0,6943 μm. Většinou pracuje v pulzním režimu. Rubínový laser se používá pro vrtání tvrdých materiálů, v lékařství v dermatologii a v laserové lokaci družic. V dnešní době se již nahrazuje především Nd:YAG laserem. [6]

Nd:YAG laser – Tento typ laseru je v dnešní době nejvíce používaným typem pevnolátkového laseru. Krystal yttrium aluminum granát dopovaný neodymem je jeho aktivním prostředím. Laser pracuje v pulzním i v kontinuálním režimu a jeho výkon dosahuje hodnot 100 až 4000 W. Paprsek má délku 1,06 μm. Buzení je optické, a to buď pomocí výbojek nebo LED diod. Oproti CO_2 laserům je velkou výhodou možnost vedení laserového paprsku optickým vláknem. Tento typ laseru se používá pro svařování, vrtání, řezání a žíhání. Další užití laseru se naskýtá v lékařství, a to jako náhrada za skalpel (kontinuální režim) nebo v oční mikrochirurgii (pulzní režim). Dále se pak užívá v radarové technice a ve spektroskopii. [6; 20]



Obr. 13 Nd:YAG laser [6]

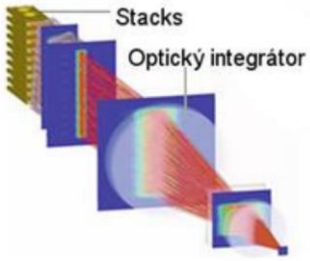
Nd:YAG lasery (schéma na obr. 13) se dají rozdělit podle tvaru aktivního prostředí na [20]:

- tyčové lasery, kdy je tyčinka dlouhá zhruba 15-20 cm a průměr je několik mm,
- vláknové lasery, kdy je optické vlákno dlouhé a rámci metrů a asi průměr 50-300 μm,
- diskový laser, kdy je disk v průměru až 100 mm a tloušťky několik desetin milimetru.

Dále Nd:YAG lasery můžeme dělit podle výkonu [20]:

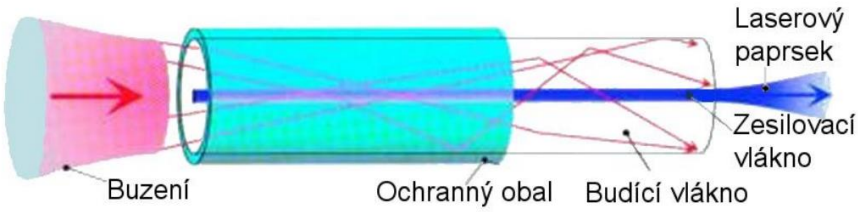
- do 200 W, které se používají v jemné mechanice, elektronice, gravírování a mikroobrábění,
- rozmezí mezi 200 až 2000 W, které se používají převážně pro řezání, svařování a pro spékání a natavování materiálu – 3D tisk,
- nad 2000 W, které se převážně používají pro svařování.

Polovodičový diodový laser – Laser používá jako aktivní prostředí polovodičový materiál. Polovodičový laser dosahuje v porovnání s ostatními lasery mnohem lepší účinnosti až 60 %. Laser disponuje dlouhou životností a jeho provozní a investiční náklady jsou nízké. Za výhodu se dá považovat i solidní kompaktnost laseru. Vlnová délka laseru se můžeme měnit a pohybuje se zhruba okolo 1 μm. Výkon laseru se pohybuje v rozsahu od několika wattů až do 15 kW u nejvýkonnějších polovodičových laserů, u kterých je provoz kontinuální. Používání polovodičovému laseru v určitých aplikací zamezuje horší kvalita a vysoký rozbíhavost jeho paprsku, což se dá považovat za hlavní nevýhodu tohoto typu laseru. Kalení a navařování nebo řezání a sváření plastů a kovových folií jsou vhodné aplikace používání tohoto typu laseru. Dále se laser také používá u laserových tiskáren, laserových ukazovátek nebo u čteček čárových kódů. Základem laseru je kazeta (viz obr. 14) – stack s několika P-N přechody, z nichž se vytváří záření laseru, která však nemá vhodný tvar. Abychom docílili vhodného tvaru laserového paprsku, musí záření projít skrze optický generátor. [6; 14; 22]



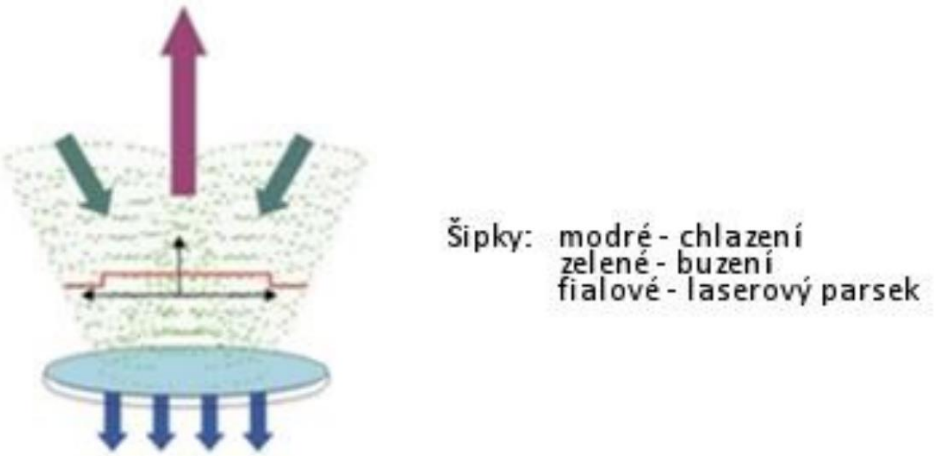
Obr. 14 Vznik laserového paprsku z kazety [22].

Vláknový laser (viz obr. 15) – Tento typ laseru patří mezi nejvíce perspektivní kategorii laserů, která nabízí uživateli velké množství výhod. Optické vlákno, které tvoří aktivní prostředí a vedení laserového paprsku, je základem laseru. V optickém vlákně dochází k buzení a vytváření paprsku laseru. U Nd:YAG laserů se vlnová délka pohybuje v řádech okolo 1064 nm. Jádro optického vlákna je dopováno prvky vzácných zemin, například erbiem, ytterbiem, praseodyem nebo kombinací těchto prvků. Vlákno může být délky až několik metrů a nahrazuje zde krystal u pevnolátkových laserů. Výhodou u vláknových laserů je, že nám odpadá nutnost seřizování optického rezonátoru díky jeho speciální technologii výroby. Další výhoda je absence potřeby optických komponentů pro navázání paprsku od zdroje záření do optického vlákna. Chlazení laseru je řešeno pomocí vzduchu po celé jeho délce a je účinnější než například u kotoučového laseru. Vláknový laser disponuje skvělou jakostí paprsku a je možné dosáhnout vysoké hustoty výkonu, až 10^9 W·cm^{-2}. LED diody mají na starost buzení a dosahují velmi solidní životnosti až 100 000 h. Účinnost laserů dosahuje hodnot až 35 % a výkon může být až 100 kW, což je však hodnota používající se spíše u speciálních aplikací. Neposlední výhodou je modulární uspořádání a příznivé provozní náklady laseru. [15; 23]



Obr. 15 Vláknový laser [7].

Diskový laser – Je to jedna z variant Nd:YAG laseru, ale disponuje mnoha rozdílnými vlastnostmi. U diskového laseru používají jiné typy aktivního prostředí a v závislosti na něm má vytvářený laserový paprsek rozdílnou vlnovou délku. Různé typy aktivního prostředí mohou dosahovat vlnových délek až ze spektra UV záření. Aktivní prostředí je ve tvaru disku (viz obr. 16), který může dosahovat průměru až v řádu desítek milimetrů a tloušťky pár desetin milimetrů. Díky tvaru a geometrii máme usnadněno kvalitní chlazení (pomocí vzduchu nebo vody) s rovnoměrnými teplotami po celé ploše disku. Takové chlazení nám dovoluje tvorbu kvalitního laserového paprsku. Výhodami diskového laseru je, že se zvyšujícím se výkonem neklesá kvalita laserového paprsku. Dobrou fokusací můžeme zmenšit tepelně ovlivněnou oblast zpracovávaného materiálu. Účinnost tohoto typu laseru se pohybuje v rozmezí 15 až 20 %. Při srovnání s vláknovým laserem je nevýhoda diskového laseru menší životnost zařízení. Diskový laser bývá používán pro aplikace, u kterých se používá vyšší výkon (řezání a sváření), ale mohou být i diskové lasery používané pro gravírování a mikroobrábění. Nejsilnější diskové laser disponují výkonem až 32 kW. [14; 20; 23]



Obr. 16 Diskový kotouč [20].

Nd:YLF laser – Aktivním prostředím je lithiumyttriumfluorid ($LiYF_4$). Paprsek má vlnovou délku 1,053 μm. [6]

ER:YAG laser – Aktivní prostředí pro Er iont tvoří YAG. Vlnové délky generovaného záření jsou 1,56 a 2,94 μm. Záření Er:YAG laseru 1,56 μm se používá v laserových dálkoměrech. [6]

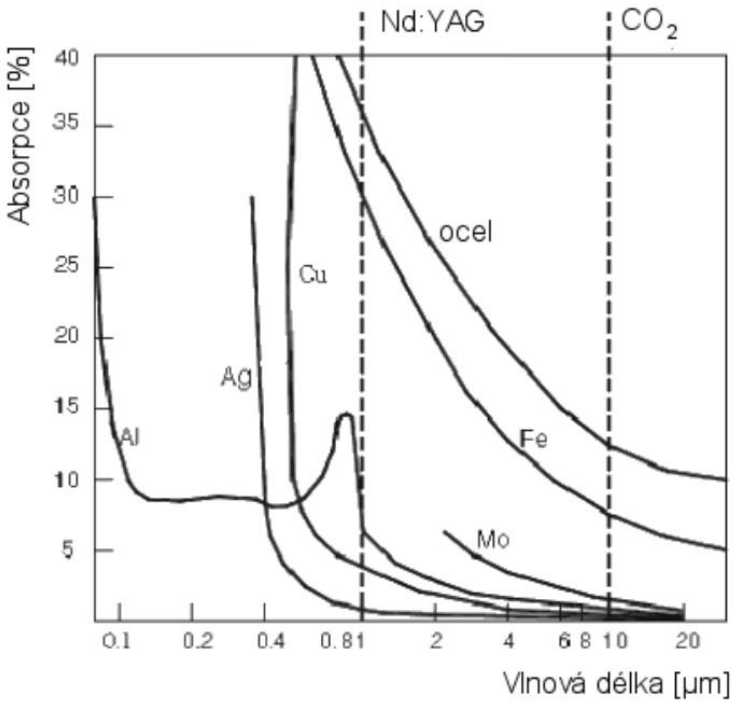
1.2.7 Absorpce laserového záření materiálem

U laserových aplikací je absorpce laserového záření materiálem důležitým parametrem. Absorpce má vliv především na pracovní rychlost a na šířku ovlivňované oblasti. Absorpce způsobuje ohřev, natavení nebo sublimaci materiálu, což závisí na hustotě výkonu, a právě na parametru absorpce daného materiálu. K absorpci, ale také k odrazu nebo k průchodu paprsku u transparentních materiálů, dochází při interakci laserového paprsku s materiálem. [24; 25]

Jednotlivé složky, do kterých se laserový paprsek rozkládá, mají dány poměr především vlnovou délkou záření a materiálem, se kterým laserový paprsek interaguje Stav povrchu materiálu, především jeho drsnost, je důležitým faktorem. Na absorpci má také vliv přítomnost oxidické vrstvy a povrchové napětí. Míra absorpce vzrůstá v přímé souvislosti s narůstající teplotou, proto můžeme absorpci zvýšit pomocí předehřevu materiálu. Dále absorpci můžeme ovlivnit povrchovou úpravou, například zdrsněním nebo povlakováním, anebo použitím laseru se speciální vlnovou délkou pro daný materiál. Laser s vyšším výkonem docílí vyšší absorpce záření, což je využíváno při zpracování materiálů (hliník, měď, stříbro a zlato) s vysokou odrazivostí a tepelnou vodivostí. Část laserového paprsku absorbují páry a plasma z odpařovaného materiálu, což má za následek snížení účinnosti paprsku. [19; 24; 25; 26]

Tab. 1 Srovnání odrazivosti materiálů při použití pevnolátkového laseru Nd:YAG s vlnovou délkou okolo 1 μm a CO_2 laseru s desetinásobnou vlnovou délkou [24].

Kov	Nd:YAG	CO_2
stříbro	96 %	99 %
zlato	95 %	98 %
měď	90 %	99 %
hliník	73 %	97 %
nikl	72 %	96 %
ocel	63 %	95 %



Obr. 17 Absorpce záření v kovech [19].

1.3 Laserové gravírování

Pojem gravírování je obecně používaný pro vytváření nápisů, log nebo ornamentů při úběru materiálu. Laserové gravírování je jen jednou z možností, jak se gravíruje. Laserové gravírování se nejčastěji používá pro označování a popisování výrobků. Podstatou laserového gravírování je odebrání tenké vrstvy materiálu zasaženého paprskem laseru. Tato technika je v dnešní době často používaná díky jeho výhodám a použitelnosti pro libovolné materiály. Častým účelem gravírování je spíše vizuální dojem než přesnost a množství odebraného materiálu. [19; 27]

Laserový paprsek je velmi univerzální nástroj, a i díky jeho bezkontaktnímu fungování je použitelný v mnoha různorodých odvětví od lékařství přes průmyslové využití až po vojenské aplikace. Laserové gravírování je jen úzkou oblastí využitelnosti průmyslových laserů. Především výkon laseru odlišuje využitelnost laseru v jednotlivých oblastech. Pro laserové

gravírování se používají výkony na spodní hranici průmyslových laserů. Dalším kritériem výkonu laseru je materiál, který laser zpracovává. Ten také přibližně určuje typ laseru s určitou vlnovou délkou, tak aby docházelo k účinné absorpci laserového paprsku materiálem. Gravírování jako značení a popisování se využívá pro široký rozsah materiálu (kovy, dřevo, sklo, plasty, kůže a další). Laser je možné za určitých podmínek použít pro jakýkoliv materiál, a proto i laserovým gravírováním lze zpracovávat i další materiály. Typickým rysem laserového gravírování je pulsní režim a použití skenovacích hlav. [19; 27]

Laser a jeho vlastnosti dělají z laserového gravírování rychlý, účinný, efektivní a přesný nástroj pro značení a popisování výrobků. Časté je také použití pro dekorativní účely. Vytvořený povrch laserem má dlouhou trvanlivost a odolnost proti poškození. Tyto výhody postupně vytlačují dříve používané způsoby popisování a značení v průmyslu. Mezi jiné možnosti gravírování a značení bez použití laserové technologie patří [28; 29]:

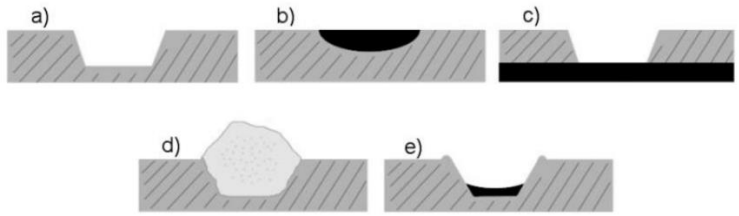
- Rytí pomocí dlát různých tvarů a velikostí, což se považuje za nejstarší gravírovací metodu a jde o velmi pracný způsob gravírování.
- Pro značení je možné použít razníky, je to jednoduchá, rychlá a levná metoda, ale vhodná pro značení pouze měkkých materiálů.
- Mikro úderové značení, jehož metoda spočívá v cyklickém vtlačování kaleného hrotu pomocí stroje, který vede tento nástroj po požadované dráze a zajišťuje pohyb nástroje.
- Tiskařské stroje, které nanášejí na povrch materiálu inkousty a barvy
- Chemická metoda (odleptání) vytvoří v povrchu reliéf nebo může dojít ke změně barevnosti povrchu materiálu.
- Na gravírování je možné použití vysokootáčkových frézek, kde nástroj je o velmi malých průměrech okolo jednoho milimetru nebo méně.
- Další způsob obrábění je elektroerozivní, díky kterému můžeme do materiálu vytvářet reliéf nebo značky.

Laserové gravírování se dá použít téměř na libovolný materiál. Jediné omezení je nutnost zvolení vhodného typu laseru, z důvodu dostatečné absorpce laserového záření daným materiálem. Mezi nejčastější materiály v této oblasti použití patří dřevo, papír, sklo a plasty. Nejvhodnější použití, díky dobré absorpci záření, je pro tyto materiály plynový CO_2 laser. Naopak u kovů je tímto laserem většina záření odraženo a proto se pro kovy a některé plasty nejčastěji používá pevnolátkový Nd:YAG laser. [28; 29]

Výkon laseru se běžně pohybuje od jednotek do stovek wattů podle materiálu a aplikace. V pulsním režimu je zejména důležitý špičkový výkon. Nastavené parametry pak ovlivňují především hloubku odebrané vrstvy materiálu a míru tepelně ovlivněné vrstvy. [28; 29]

Gravírovací lasery se dají použít i pro další operace, například pro řezání tenkých fólií plastových a jiných materiálů nebo papíru. [28; 29]

Gravírování a značení laserem je rychlé z důvodu vysoké rychlosti pohybu paprsku, který nejčastěji vystupuje ze skenovací hlavy. Rychlost, kterou se může paprsek pohybovat po povrchu materiálu, může být až několik metrů za sekundu, nevýhodou je však omezený pracovní rozsah. Na kvalitě gravírovaného nebo značeného povrchu závisí velikost stopy laserového pulsu a míra překrytí jednotlivých pulsů. Na obr. 18 jsou možné způsoby gravírování a značení. [28; 29]



a) odebrání materiálu
b) změna barvy
c) odebrání materiálu určité vrstvy
d) zpěnění
e) odebrání a změnou barvy materiálu

Obr. 18 Způsoby gravírování a značení [29].

Podrobný popis obr. 18 [29]:

a) Odebrání materiálu v určité šířce a hloubce v závislosti na použitých pracovních parametrech laseru. Laserový paprsek pronikne materiálem a vytvoří viditelný reliéf. Tato metoda se používá téměř pro jakýkoliv materiál.

b) Změny barevnosti v místě interakce laserového paprsku s povrchem materiálu je možné využít i u ocelí, které od teploty 600 °C začínají měnit barvu. Dosažením této teploty bychom se měli dostat na kalící teplotu. Podle použitého výkonu laseru dojde k ohřátí a zároveň ke zbarvení povrchu.

c) Odebráním tenké vrstvy materiálu, barevně odlišné od základního materiálu, zaručí vysoký kontrast. Tato metoda je používaná u povlakovaných kovů, jako je např. eloxovaný hliník nebo u plastů.

d) Zpěnění materiálu je další způsob zviditelnění plochy v místě dopadu laserového paprsku. Tento způsob je používaný u plastů, u kterých dojde ke zpěnění a převýšení nad okolní povrch, může dojít i ke změně barvy zpěněného materiálu.

e) Kombinace metody a) a b), kdy dojde zároveň k odebrání materiálu a změně barvy materiálu v místě dopadu paprsku.

Základní parametry laserů pro gravírování jsou:

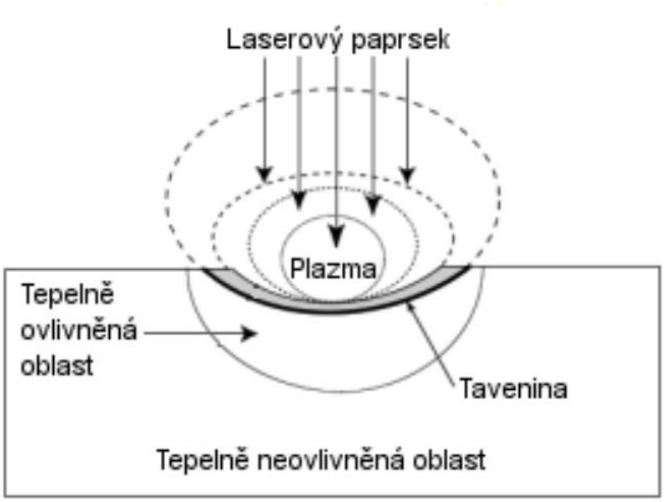
- velikost pracovní plochy, která je dána skenovací hlavou,
- rozlišení v DPI (dots per inch – počet bodu na palec),
- maximální pracovní rychlost.

1.3.1 Interakce laserového paprsku s materiálem

Hlavní charakteristikou laserového paprsku je vysoká intenzita záření na malé ploše, což způsobuje vysokou rychlost ohřátí v místě dopadu paprsku, zatímco okolní materiál zůstává bez tepelného ovlivnění. Jakmile paprsek změní polohu působení nebo je jeho záření přerušeno dochází v zasaženém místě k rychlému tuhnutí a chladnutí. Týká se to kontinuálních nebo pulzních laserů s délkou pulzu do 10^{-6} s, kratší pulzy se převážně odpařuje a sublimuje materiál a tepelně ovlivněná oblast se s klesající délkou pulzu zmenšuje. Při interakci paprsku s materiálem je především důležitá míra absorpce, kterou ovlivňují optické a tepelné vlastnosti materiálu, a především použitý laser s danou vlnovou délkou. V gravírování, kdy je dosahováno vysokého špičkového výkonu, dochází k abnomální absorpci a laserový paprsek je materiálem absorbován mnohem lépe. [24; 27; 30; 32]

Materiál se v místě dopadu paprsku začíná ohřívat, může se až tavit, odpařovat nebo sublimovat a tím se v materiálu vytvářet plazma. Odpařovaný materiál a plazma snižují výkonovou hustotu paprsku, protože částečně absorbují laserový paprsek a také dochází k rozptylu. Tento problém lze částečně vyřešit stlačeným plynem přiváděným do místa kontaktu laserového paprsku a povrchu materiálu. Kráter, generovaný laserovým pulsem, dosahuje obvykle průměru až

100 μm a hloubky několika mikrometrů, v závislosti na parametrech laserového paprsku a provozních parametrech laseru. Chování materiálu po interakci s laserovým paprskem se také liší podle typu materiálu, každý materiál reaguje na laserový paprsek jinak. Příklad chování materiálu je zobrazen na obr. 19. [19; 24; 32; 34]

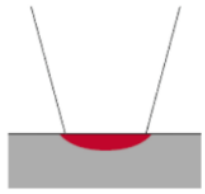
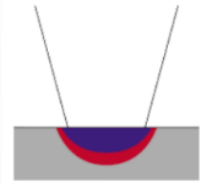
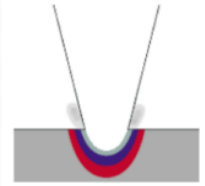
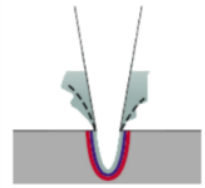
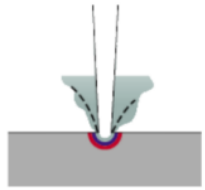
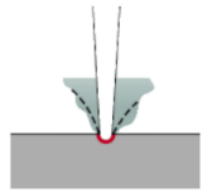


Obr. 19 Interakce laserového paprsku s materiálem [34].

Způsob odstranění materiálu je závislý především na intenzitě laserového paprsku. Když je materiál natavený, k odstranění taveniny je nejčastěji použitý stlačený plyn. Při vyšších intenzitách záření dochází k vypařování materiálu a z části je tavenina odstraněna díky expanzi par taveniny (materiálu). Při vysokých intenzitách záření a při krátkých pulsech materiál převážně sublimuje a tím je odstraňován. [35]

Výkonová hustota laserového paprsku, jeho fokusace a délka pulsu ovlivňují skutečnost, zda se materiál, na který laserem působíme pouze ohřeje, nebo dojde až k jeho sublimaci. Této skutečnosti využívají různé aplikace laserů. Kalením dochází pouze k ohřátí poměrně velké plochy, během vrtání se paprsek zaměřuje na velice malou plochu a pracuje s velkou hustotou výkonu, kdy dochází převážně k sublimaci a vypařování materiálu. V tab. 2 je znázorněno rozdělení v závislosti na hustotu výkonu, dále jsou nastíněny příklady použití a proces, který vzniká při dopadu laserového paprsku na materiál po určitý čas. V grafickém znázornění v tab. 2 červená oblast značí tepelně ovlivněný materiál, modrá oblast roztavený materiál, šedá oblast mimo základní materiál značí páry odcházející pryč z obrobku a čárkovaná čára vyvržený materiál. [35]

Tab. 2 Příklady použití podle hustoty výkonu a délky pulsu [36].

Grafické znázornění	Proces	Hustota výkonu	Délka interakce	Použití
	Ohřátí	3.10^3 W·cm^{-2}	s	Kalení a pájení
	Tavení	10^5 W·cm^{-2}	ms	Kondukční sváření
	Tavení a vypařování	10^6 W·cm^{-2}	ms	Penetrační sváření
	Vypařování	10^8 W·cm^{-2}	ms-ns	Vrtání
	Vypařování a ionizace	10^9 W·cm^{-2}	ns	Ablování a gravírování
	Sublimace	10^{12} W·cm^{-2}	ps-fs	Strukturování

V případě, že laser pracuje s kratšími pulsy, tak je oblast ovlivněná působením laseru menší. Při délkách pulsů zhruba okolo 10 ps (ještě záleží na konkrétním materiálu) již nedochází k přenosu tepla z roztaveného a sublimovaného materiálu do přilehlých částí materiálu. Tato skutečnost s využívá při procesu gravírování a také mikroobrábění s ultrakrátkými pulsy.

Teoretickou hloubku kráteru po zasažení materiálu laserovým pulsem, která platí pro kráter s konstantní hloubkou a ostrými hranami, můžeme určit pomocí následujícího vztahu [27]:

$$z = \delta \cdot \ln\left(\frac{\Phi}{\phi_{th}}\right), \tag{2.1}$$

kde: z - teoretická hloubka kráteru [μm],
δ - hloubka penetrace zařízení [μm],
Φ - hustota špičkové energie [J·cm^{-2}],
Φ_{th} - hraniční hustota energie [J·cm^{-2}].

1.3.2 Paprsek laseru

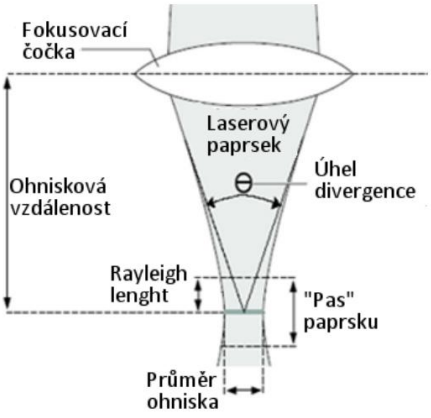
Laserový paprsek má mnoho parametrů, které jej charakterizují a jednou z hlavních charakteristik laserového paprsku je jeho vlnová délka. Další významný charakteristický parametr laseru je příčné rozložení intenzity v paprsku. M^2 popisuje, jak velká je odchylka od ideálního tvaru paprsku, tj. Gaussovy křivky a nabývá hodnot větších jak 1. K-číslo vyjadřuje podobný parametr jako je M^2, ale liší v číselném vyjádření a pohybuje se v hodnotách od 0 do 1, kdy hodnota 1 představuje ideální tvar paprsku (M^2 je převrácenou hodnotou K-čísla). BPP (beam parametr product) je používán jako parametr definující kvalitu laserového paprsku. [15; 11]

Vztah pro výpočet BPP:

$$BPP = \frac{\omega \cdot \theta}{2} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot M^2, \tag{2.2}$$

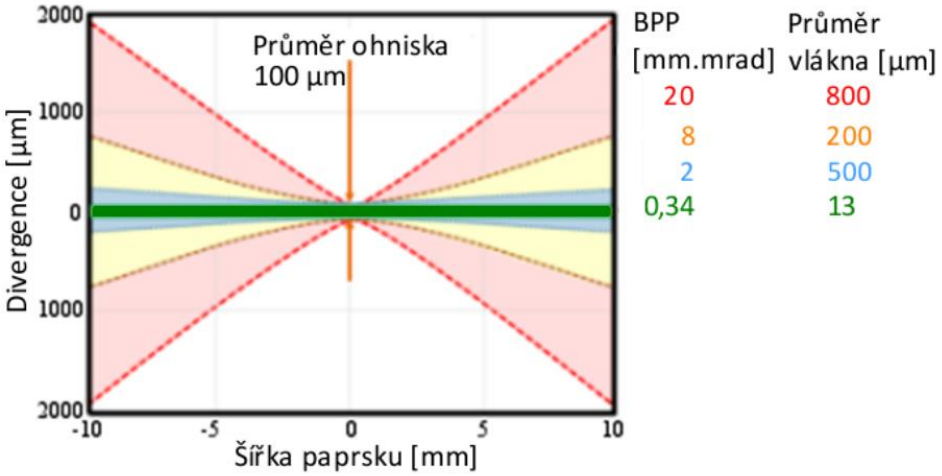
kde:
- BPP - beam parametr product [mm·rad],
- ω - průměr ohniska [mm],
- θ - úhel divergence [rad],
- λ - vlnová délka [mm],
- π - Ludolfovo číslo [-],
- M^2 - parametr charakterizující laserový paprsek [-].

Norma DIN EN ISO 11145 nám přesně stanovuje parametry BPP a M^2. Vlnová délka souvisí se schopností laserového paprsku se fokusovat do ohniska (schematicky zobrazeno na obr. 20). Lze obecně prohlásit, že čím kratší vlnová délka je, tím lépe můžeme zaostřit paprsek na menší plochu a též lze prohlásit, že s menším průměrem ohniska přichází vyšší intenzita záření. Ohnisková vzdálenost má také souvislost s průměrem ohniska. S kratší ohniskovou vzdáleností lze docílit menšího průměru ohniska. U gravírování jsou často využívány skenovací hlavy, u kterých je ohnisková vzdálenost veliká. Cíl fokusování laserového paprsku do jednoho bodu je pouze na teoretické rovině, jelikož má laserový paprsek Gaussovo rozložení intenzity záření, a tak má ohnisko určitý průměr a zabírá určitou plochu. Též vzniká pas, kde laserový paprsek utváří válec a zařízení je téměř rovnoběžné. Rayleigh lenght je označení pro polovinu tohoto válce a určuje míru ostrosti. [11; 19; 36]



Obr. 20 Fokusace paprsku [11].

Konstrukce laseru, hlavně pak optické komponenty a průměr optického vlákna, nám určuje parametry M^2 a BPP (viz obr. 21). Další konstrukce laseru určující tyto parametry jsou chlazení, jelikož díky účinnému chlazení můžeme dosahovat vysoké kvality paprsku laseru. Dále tyto parametry ovlivňuje výkon laseru a délka pulsu. [37]

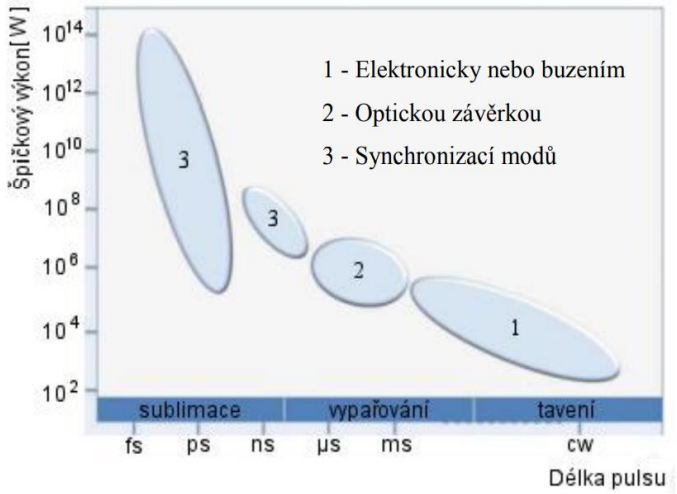


Obr. 21 Příklad závislosti BPP na průměru optického vlákna [37].

1.3.3 Pulsy laseru

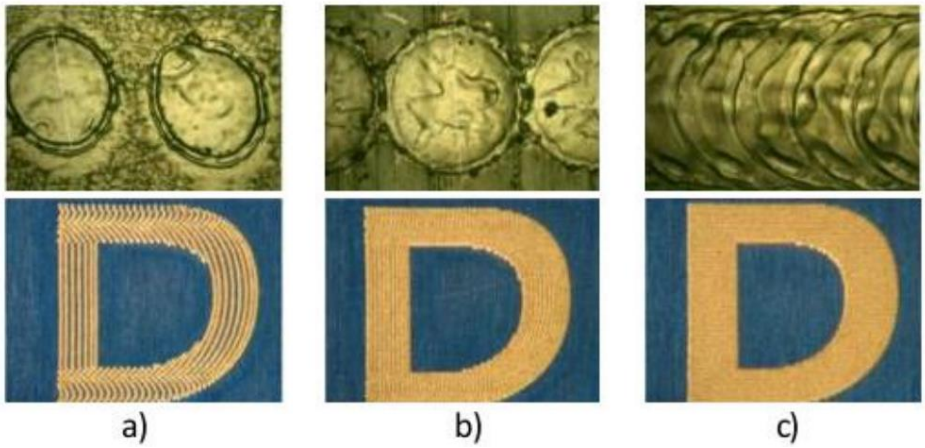
Při procesu gravírování je standardem pulsní režim laseru. Délka pulsu je jeho hlavním kritériem a u speciálních aplikací se může pohybovat i v řádech několika femtosekund, což je 10^{-15} s (schematicky zobrazeno na obr. 22). Délkou pulsu především ovlivňujeme velikost tepelně poznamenané oblasti materiálu. Hlavní faktor, který určuje délku pulsu je konkrétní způsob použití laseru. Pulsní režim je charakterizován vysokými špičkovými výkony. Zkracování délky pulsu má za následek klesání průměrného výkonu laseru, ale také růst špičkového výkonu, což je jev hojně využíván v oblasti mikroobrábění. [19; 34]

Průmyslové lasery fungují v pulsním nebo v kontinuálním režimu. V pulsním režim může pracovat kterýkoliv laser, u kterého lze nastavit „zapínání a vypínání“ laserového paprsku v dostatečně krátkém horizontu. Způsoby, kterým tohoto režimu můžeme dosáhnout jsou různé. Například to jde elektronickým zařízením nebo buzením aktivního prostředí zábleskovou výbojkou. Dále to může být optickou uzávěrkou anebo synchronizací módu. [19]



Obr. 22 Způsoby generování pulsů a závislost špičkového výkonu na délce pulsu [19].

Frekvence pulsů a posuvová rychlost paprsku laseru se nastavuje v závislosti na konkrétní požadavky konkrétní aplikace. Je vhodné, aby ideální docházelo k překrytí jednotlivých pulsů. Správné nastavení parametrů má za následek lepší vizuální dojem z obráběného materiálu. [38]



Obr. 23 Rozložení jednotlivých pulsů [38].

Na obr. 23 můžeme vidět tři varianty překrytí jednotlivých pulsů. Ve sloupečku a) překrytí nebylo použito. Ve sloupečku b) bylo překrytí menší jak 5 % a ve sloupečku c) bylo překrytí více jak 60 % a počet pulsů byl nejvyšší. [38]

1.3.4 Základní materiály vhodné pro gravírování

Laserové gravírování nám nabízí díky vysokým špičkovým výkonům obrábět snad veškeré materiály ať jsou to tvrdé krystaly diamantu nebo měkké polymery. Tuto universálnost zapříčiňuje anomální absorpce laserového paprsku u všech materiálů při vysokých špičkových výkonech. Dále záleží na konkrétní hodnotě špičkového výkonu u konkrétního materiálu. U laserů, které pracují v ultrafialové oblasti záření, nastává absorpce u veškerých materiálů už při normálních hodnotách výkonů. Pro odstraňování taveniny je používán například stlačený plyn, který je přiváděn do místa kontaktu laserového paprsku s obráběným materiálem. Častější je však pro odstranění materiálu využívána sublimace. [34; 39]

Polymery se při laserovém gravírování mají různé chování v závislosti na teplotě a na konkrétním druhu polymeru a ovlivňuje to spotřebu vstupní potřebné energie. Výsledek gravírování laserem závisí, kromě na typu použitého plastu, na aditivech jako jsou například barviva. Téměř všechny z druhů plastů a termoplastů může být gravírováno laserem. Pokud by to vlastnosti plastu zamezovali, mohou být zpravidla modifikovány vhodnými aditivy. Aditiva, jako jsou barevné pigmenty, mohou také ovlivnit kapacitu laserového gravírování. Odlišné může být chování polymerů během interakce s paprskem z oblasti UV nebo IR záření. S kratšími vlnovými délkami se dosahuje menší tepelně ovlivněné oblasti a zároveň lepší kvality povrchu a výsledné přesnosti. [28; 39; 40]

Kovy jsou považovány za velmi robustní a odolné materiály a jsou k dispozici v mnoha různých typech. Lasery jsou vhodné pro značení mnoha různých typů kovů. Gravírování kovů laserem je extrémně přesný a čistý způsob. Gravírování, jako jsou sériová čísla, kódy a loga mohou být použity na produktech a komponentech v maximálním rozlišení. Kovové gravírování laserem je bezkontaktní a kovový povrch není poškozen. Každý kov však reaguje na laserový paprsek odlišně. Typické oblasti použití pro laserové gravírování kovů je například označování výrobků a kódování v elektronickém průmyslu, konstrukčních nástrojů a zdravotnické techniky. [39; 41]

Sklo disponuje slušnou absorpcí delších vlnových délek laserového paprsku. Absorpce se výrazně snižuje se zkracující se vlnovou délkou. Nejčastěji používaný laser pro gravírování

skla je proto CO_2 laser nebo lasery z oblasti UV záření, které mají dostatečnou absorpci. Absorpce je také závislá na hodnotě špičkového výkonu. Gravírování skla nabízí široké možnosti designu. Dokonce i ty nejvíc sofistikované fotografie a grafiky jsou vyryté přímo na sklenice na víno, pivní sklenice, lahve nebo zrcadla. Jakékoliv provedení, které je možné vytisknout, může být také gravírováno laserem na sklo. [19; 34; 42]

Dřevo, respektive dřevěné výrobky jako jsou například hračky, dekorativní předměty, umělecké rukodělné výrobky, suvenýry, vánoční ozdoby, dárky, architektonické modely jsou vhodné pro laserové gravírování. Při gravírování dřeva laserem jsou zvláště důležité vysoká rychlost zpracování a čisté hrany. Lasery by měly vytvářet čistý povrch a přesné hrany, a to i při gravírování velmi složitých tvarů. Při gravírování laserem navíc nevznikají žádné piliny, a tak odpadají časově náročné a složité procesy čištění. [43]

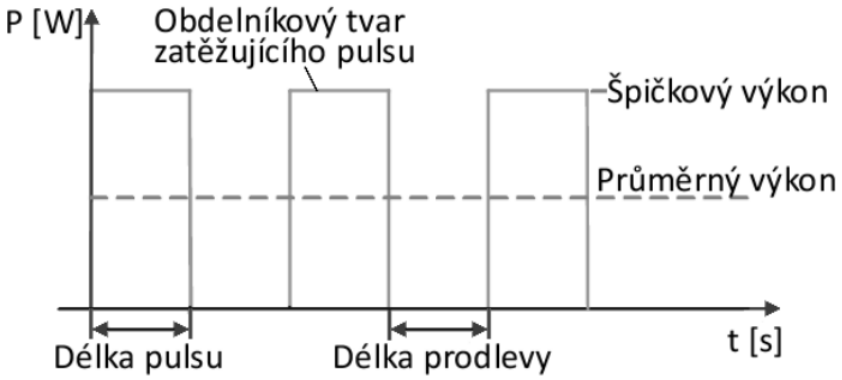
1.3.5 Parametry laseru

Jako u každého procesu, tak i u gravírování, je důležité zvolit si vhodné pracovní procesy a nástroje, u kterých vhodně zvolíme jejich pracovní parametry. Různé typy laserů poskytují odlišné nastavení jejich parametrů. Mezi základní parametry daného laseru a jeho optiky patří [11; 19; 44]:

- Vlnová délka [µm],
- M^2 parametr [-],
- BPP [mm·rad],
- ohnisková vzdálenost [mm],
- tvar výstupního paprsku (tvar stopy paprsku na materiálu – kruhová, čtvercová, …).

Dále máme parametry, které jsou dány pouze typem laseru [11; 19; 44]:

- průměrný výkon [W],
- špičkový výkon [W],
- výkonová hustota [$W \cdot cm^{-2}$],
- frekvence [Hz],
- délka pulsu [s],
- energie pulsu [J],
- energetická hustota [$J \cdot cm^{-2}$],
- průměr ohniska [mm],
- rychlost pohybu paprsku [$m \cdot min^{-1}$],
- průběh (tvar) zatěžujícího pulsu,
- duty [%] (poměr délky zatěžujícího pulsu k celkové délce periody vyjádřená v procentech, viz obr. 24).



Obr. 24 Znázornění duty asi 50 % [11].

Vztah pro výpočet průměrného výkonu [44]:

$$P_{AVG} = E \cdot f, \tag{2.3}$$

kde: P_{AVG} - průměrný výkon [W],
E - energie pulsu [J],
f - frekvence pulsů [Hz].

Vztah pro výpočet špičkového výkonu [43]:

$$P_{PEAK} = \frac{E}{t}, \tag{2.4}$$

kde: P_{PEAK} - špičkový výkon [W],
E - energie pulsu [J],
t - časová délka pulsů [s].

Vztah pro výpočet hustoty špičkového výkonu [44]:

$$\Phi = \frac{P_{PEAK}}{S}, \tag{2.5}$$

kde: Φ - hustota špičkového výkonu [W·cm^{-2}],
P_{PEAK} - špičkový výkon [W],
S - poloha ohniska [cm^{-2}].

1.3.6 Porovnání s jinými procesy

Gravírování v širším pojetí znamená jakoukoliv technologii, která slouží k vytváření grafických objektů na předmětech. Může se jednat o označování předmětů, vytváření reliéfů, výrobu razítek, a podobně. Nejčastěji se používá k vytváření různých dárkových předmětů, zdobení cen pro vítěze, medailí, štítků na dveře, psích známek. V minulosti, kdy ještě nebyly tak dostupné dnešní laserové stroje, ale stále i v dnešní době je pro tento způsob mikroobrábění využíváno mnoho jiných technik jako například rytí, tištění nebo leptání nebo gravírování na pantografu.

Rytí se provádí za pomocí diamantového rycího hrotu. Ten se za nepřetržitého přítlaku pohybuje po rytém materiálu. Díky stopě po hrotu vzniká v tenké povrchové vrstvě materiálu trvalá plastická deformace. Vyrytý reliéf se skládá z mnoha tenkých čar. Rytím se gravírují především kovy (zlato, stříbro, mosaz, nerez, eloxovaný hliník), ale také plasty nebo sklo. Tato technologie je stále uplatňovaná například ve šperkařství. Příklad rytí je zobrazeno na obr. 25. [45]

Obr. 25 Příklad rytí pomocí diamantového hrotu. [45]

Tištění je proces, při kterém se opět používá diamantový hrot, ale oproti rytí není s hrotem po povrchu součásti pohybováno za stálého tlaku. Při tištění se vytváří rychlými údery velké množství důlků umístěných v těsné blízkosti vedle sebe. Takto je materiál potisknut podobným způsobem, jako když klasická tiskárna tiskne na papír. Díky tomu tisknout nejen texty, ale třeba i rastrové obrázky, které jsou samozřejmě v jedné barvě. Technologie umožňuje tištění výhradně na kovy, kdy se nejčastěji používají spíše měkké kovy jako je zlato, stříbro, mosaz, měď nebo hliník. Příklad tištěni do kovu je na obr. 26. [46]

Obr. 26 Příklad tištění do kovu [46].

Leptání je chemické obrábění, které spočívá v řízeném odleptávání materiálu do hloubky od několika setin milimetru až do několika milimetrů. Principem, při kterém je odebírán materiál, je chemická reakce mezi materiálem obrobku a reaktivním prostředím lázně, do které je obrobek ponořen. Toto prostředí může být zásadité nebo kyselé. Leptání je vhodné především k úběru materiálu u velkoplošných obrobků. Dále je vhodné k mikroobrábění velkých a tvarově složitých dílů, které by bylo časově a technologicky náročné a v některých případech i nemožné obrábět konvenčními postupy. Místa, která během procesu nemají být porušena, se potírají speciálními povlaky, takzvanými maskami. Proces nanášení masky se nazývá maskování. Maska chrání materiál obrobku před působením reaktivního prostředí lázně, a tak nedochází k úběru materiálu. [24]

Pantograf je stroj (viz obr. 27) založený na práci soustavy pák, táhel a kloubů. Do snímací části stroje se umístí zvětšená kopie výsledného produktu, která je přesně snímána vodícím prvkem, což je velmi často vodící kolík, který přenáší svůj pohyb na pohyb frézy. Výhodou tohoto stroje je jednoduchost a také příznivá cena. Stroj má však i řadu nevýhod, jako je například nutnost

předem vyhotovit vzor obrazu, který bude sloužit pro vedení pantografu. Další nevýhody jsou například nízká rychlost gravírování nebo omezenost při změně požadované velikosti gravírované plochy. [47]

Obr. 27 Pantografická frézka [48].

1.3.7 Stroje pro laserové gravírování

Laserové stroje (příklad na obr. 28), které zvládají proces gravírování, disponují hlavním společným znakem, a to je kvalitní paprsek, který umožňuje zaostření na co nejmenší stopu. Často využívané lasery pro mikroobrábění s vyššími nároky jsou pevnolátkové lasery. Vlnová délka se ve většině případů pohybuje v zelené části spektra záření (asi 530 nm), jelikož je tam možné docílit zaostření s polovičním průměrem ohniskové vzdálenosti, než u laserů s vlnovou délkou 1064 nm. Jsou však používány i lasery pracující s vlnovými délkami v UV až IR oblasti. Konkrétními zástupci laserů v oblasti mikroobrábění bývají diskové a vláknové lasery, které vynikají dobrou kvalitou paprsku. Pořídit si takové laserové stroje lze například od firem jako jsou PrenovaTec nebo Trumpf. Jedny z nejvýznamnějších společností na výrobu vláknových laserů jsou však IPG nebo JK Lasers a Rofin. Na speciální použití lze zvolit i excimerové lasery, které pracují s vlnovou délkou v UV oblasti záření, například od firmy Coherent. Na innoslab lasery, které se také používají na různé oblasti mikroobrábění, se zaměřuje výrobce Edgewave. Nejčastěji používané stroje v oblasti gravírování, když nemáme kladené vysoké nároky na přesnost, jsou CO_2 lasery například od firem Rofin, Coherent a Trumpf. U takových laserů však vlivem dlouhé vlnové délky není možné zaostřit paprsek na malou plochu, jako u jiných laserů, které mohou pracovat s kratší vlnovou délkou. [19; 20; 31; 35]

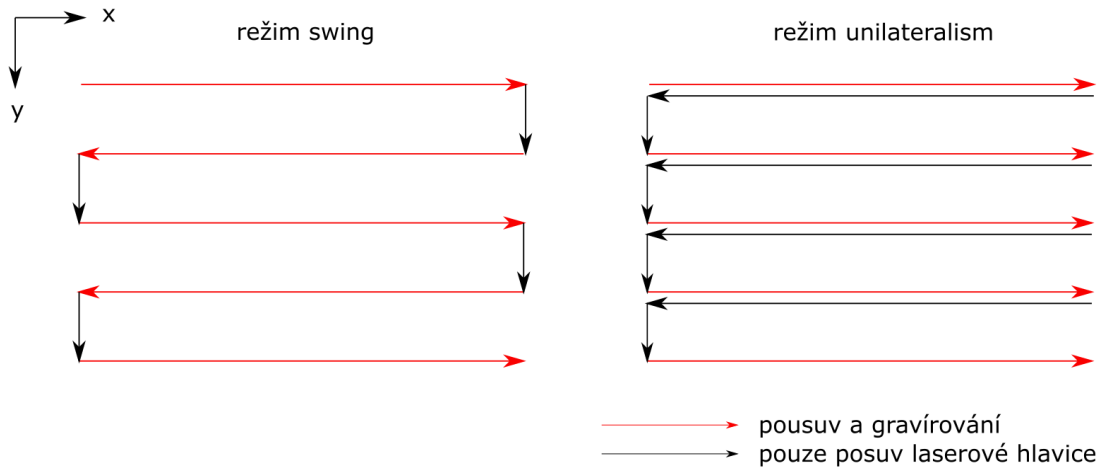
Nutnou záležitostí u těchto laserů je schopnost pracovat v pulzním režimu. Časová délka pulsu je totiž jeden z hlavních faktorů, který nám určuje velikost tepelně ovlivněné oblasti. Obvykle je délka pulsu v řádech μs a ns, ale může být u náročnějších aplikací i kratší, a to v řádech ps a fs. Frekvence pulsů má zásadní vliv na rychlost procesu a souvisí s ní také velikost tepla, které je vneseno do materiálu. U velmi krátkých pulsů se může frekvence měřit až v řádech MHz, většinou se však pohybujeme v rámci desítek až stovek kHz. Průměrný výkon má u takových laserů hodnotu v rámci desítek až stovek wattů. Nízký průměrný výkon je vyvážený vysokým špičkovým výkonem a ten může nabývat hodnot až desítek GW. S výkonem je souvislosti hodnota energie pulsu pohybující se v řádech μJ až mJ. [27; 35]

Software pro vytváření programu k laserovému gravírování je nedílnou součástí laserových strojů. U gravírování je často v programu uložena knihovna, kde je možné dohledat mnoho druhů písemných fontů, znaků a základních tvarů. Jiné obrazce a další složitější tvary si uživatel musí vytvořit sám nebo má možnost data importovat z programů třetích stran.

Obr. 28 Univerzální sestava laserového stroje [33].

2 PRAKTICKÁ ČÁST

K laserovému gravírování lze použít mnoho laserových strojů od renomovaných výrobců. Pro účel následujícího experimentu byl však zvolen laserový stroj dílensky sestavený z průmyslových komponent a poloprofesionálním řízením. Účelem experimentu bylo zjištění korekcí pro jednotlivé rychlosti posuvu laserové hlavice. Korekce je nutné zjistit, chceme-li gravírovat v režimu swing, což je režim, při kterému laserová hlavice gravíruje v obou směrech posuvu po ose x. Gravírování lze provádět také v režimu unilateralism (rozdíl mezi těmito režimy na obr. 29), u kterého korekce zavádět do systému nepotřebujeme, ale tento režim zapříčiní, že laserová hlavice gravíruje pouze v jednom směru osy x. Primární důvod užívání režimu swing oproti režimu unilateralism je úspora času. Režim unilateralism je tedy vhodný v případě, že se použije pouze pro kusovou výrobu a korekce neznáme. Důvod zjišťování korekcí je zapříčiněn nevyhnutelnou vůlí ve vedení laserové hlavy v řemenu a řemenici. Kvůli této vůli a rázům při změně směru pohybu laserové hlavy vzniká nepřesnost, která je zavedením korekcí do systému eliminována. V případě, že uživatel korekce nezná, a přesto se rozhodne pracovat v režimu swing, může být výsledný gravírovaný povrh od pohledu rozmazán. Jednotlivé gravírované body v řádcích pod sebou totiž nebudou seřazeny v pravidelné mřížce, což způsobuje onu nepřesnost a rozmazání gravírovaného povrchu.



Obr. 29 Porovnání režimu swing a unilateralism

Výstupem experimentu bude graf závislosti rychlosti posuvu na korekci. Hodnoty rychlosti posuvu, které v něm nebudou přesně zaneseny v grafu si systém dokáže sám aproximovat ze dvou nejbližších hodnot, které byly přesně naměřeny.

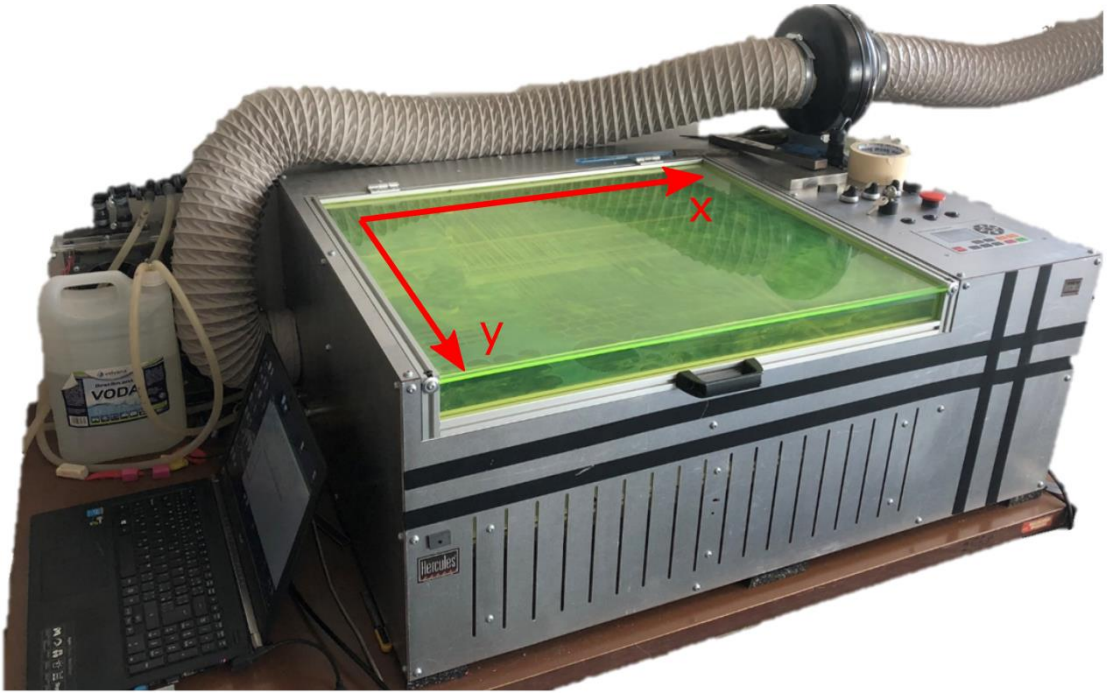
2.1 Souhrn používaných strojů, materiálu a pomůcek

Pro provedení experimentu byl použit dílensky sestavený stroj osazený průmyslovými komponentami s poloprofesionálním řízením, blíže specifikován v následujících řádcích. Poté k vyhodnocení experimentu byl použit mikroskop s kamerou přenášející obraz pomocí softwaru do počítače a také zařízení vlastní výroby usnadňující práci se vzorky pod mikroskopem.

Konkrétní popis všech strojů, materiálu a pomůcek

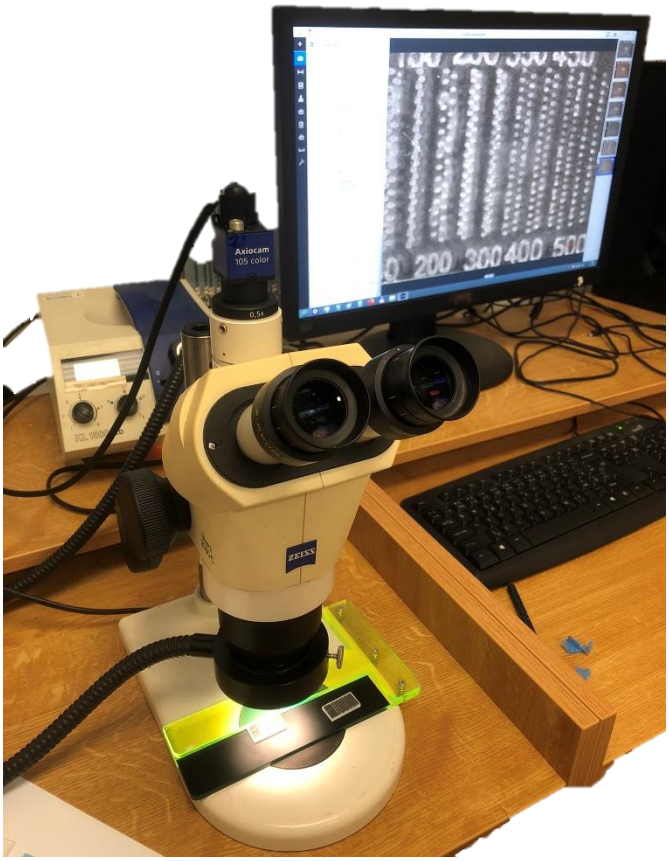
- Laser (viz obr. 30):
  - typ laseru: CO^2 se skleněnou trubicí,
  - výkon laseru: 40 W,
  - vlnová délka laseru: 10 600 nm,

  - režim laseru: kontinuální/pulzní,
  - frekvence pulsů: 20 kHz,
  - DPI: 100.
- Laserová hlava:
  - ohnisková vzdálenost: 68 mm,
  - fokusační čočka: D25 FL68.
- Chlazení CO2 trubice: vodní s regulovaným průtokem.
- Řídící systém: AWC608 – Lightobject.



Obr. 30 Laserový stroj s naznačenými osami.

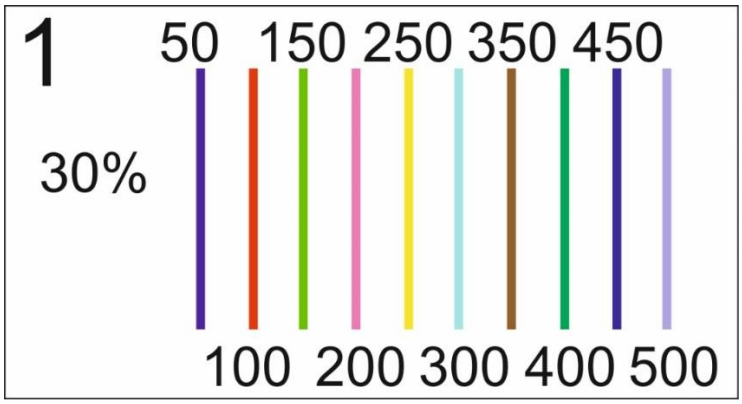
- Mikroskop: Stemi 2000-C (viz obr. 31).
- Kamera k mikroskopu: ZEISS Axiocam 105 color.
- Software k mikroskopu: ZEIS ZEN 2.
- Materiál vzorků: plexisklo o tloušťce 2 mm až 5 mm.
- Pomocné zařízení k mikroskopu (vlastní výroba, usnadňuje manipulaci se vzorky, vzorek má na snímku lepší kontrast díky černé folii).



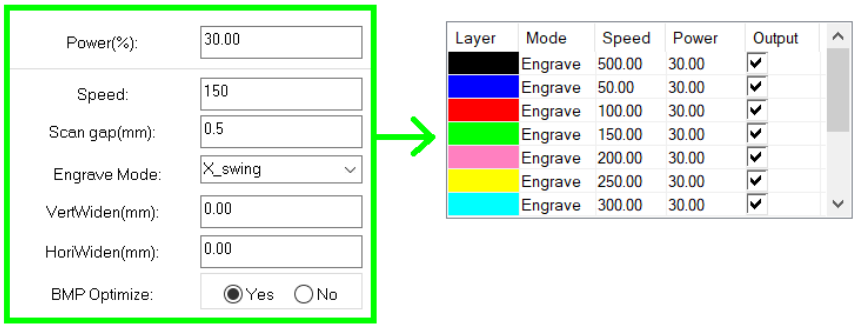
Obr. 31 Zkoumání vzorků pod mikroskopem.

2.2 Příprava a gravírování vzorků k měření

Jako první úkon bylo nutné zjistit rozměry bodů interakce laserového paprsku s gravírovaným materiálem. Pro tento úkon byl v programu LaserCAD vytvořen vzorek 28 mm na 15 mm, kde bylo gravírováno deset tenkých pásků o rozměrech 0,25 na 10 mm (viz obr. 32). Takto malá šířka pásků způsobila, že v jedné vrstvě na ose x byl pouze jeden bod. Každý z těchto desíti pásků byl gravírován s rozdílnou hodnotou posuvu od 50 $mm \cdot s^{-1}$ krokem po 50 $mm \cdot s^{-1}$ až do hodnoty posuvu 500 $mm \cdot s^{-1}$. Takovýchto vzorků bylo postupně vygravírováno 10 a jednotlivé vzorky byly umístěny vedle sebe na ose x. Proces gravírování byl jednotlivě rozdělen pro každý vzorek tak, aby jednotlivé vrstvy na ose x nebyly gravírovány pro všechny vzorky zároveň.



Obr. 32 Příklad vzorku číslo 1.



Obr. 33 Příklad nastavování jednotlivých vrstev s rozdílnými parametry.

V případě, že by se tyto pásky gravírovaly metodou unilateralism, tak by body na ose y byly zarovnané do liniové spojnice ve sloupci pod sebou. Avšak kvůli nepřesnostem způsobenými kinematikou a dynamikou stroje při používání metody swing se nám body seřadily ve dvou sloupcích, tedy pod sebou byly pouze ty body, které byly propáleny, když se laserová hlava pohybovala stejným směrem.

Scan gap, což je vzdálenost jednotlivých vrstev na ose y, byl nastaven pro všechny rychlosti stejně na hodnotu 0,5 mm. Takovouto vzdáleností bylo docíleno dostatečné přehlednosti při měření pod mikroskopem, tedy aby se jednotlivé body nepřekrývaly.

2.3 Měření vzorků

Žádný z deseti vzorků od pohledu nevykazoval známky odlišnosti, přesto však následně vzorky prošly podrobnější analýzou pod mikroskopem. Analýza se zaměřila zejména na rozměry jednotlivých bodů ve dvou směrech a jejich vychýlení vůči bodu předchozímu. Pro dostatek dat a následné zpracování a vyhodnocení korekcí bylo nutné proměřit každý z těchto 10 vzorků. V případě zjišťování velikostí bodů byly vybrány pouze 2 vzorky, což i tak přineslo dostatek dat na zpracování a vyhodnocení. Nasbíraná data byla dále statisticky vyhodnocena.

Vztah pro výpočet aritmetického průměru:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \tag{3.1}$$

kde: $\bar{x}$ - aritmetický průměr [mm],
x_i - prvek statistického souboru o indexu i [mm],
n - počet prvků statistického souboru [-].

Vztah pro výpočet rozptylu:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2, \tag{3.2}$$

kde: σ^2 - rozptyl [-],
$\bar{x}$ - aritmetický průměr [mm],
x_i - prvek statistického souboru o indexu i [mm],
n - počet prvků statistického souboru [-].

Vtah pro výpočet směrodatné odchylky:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}, \tag{3.3}$$

kde: σ - směrodatná odchylka [-],
σ^2 - rozptyl [-].

Medián je hodnota, která dělí řadu vzestupně seřazených výsledků na dvě stejně početné poloviny. Platí, že nejméně 50 % hodnot je menších nebo rovných a nejméně 50 % hodnot je

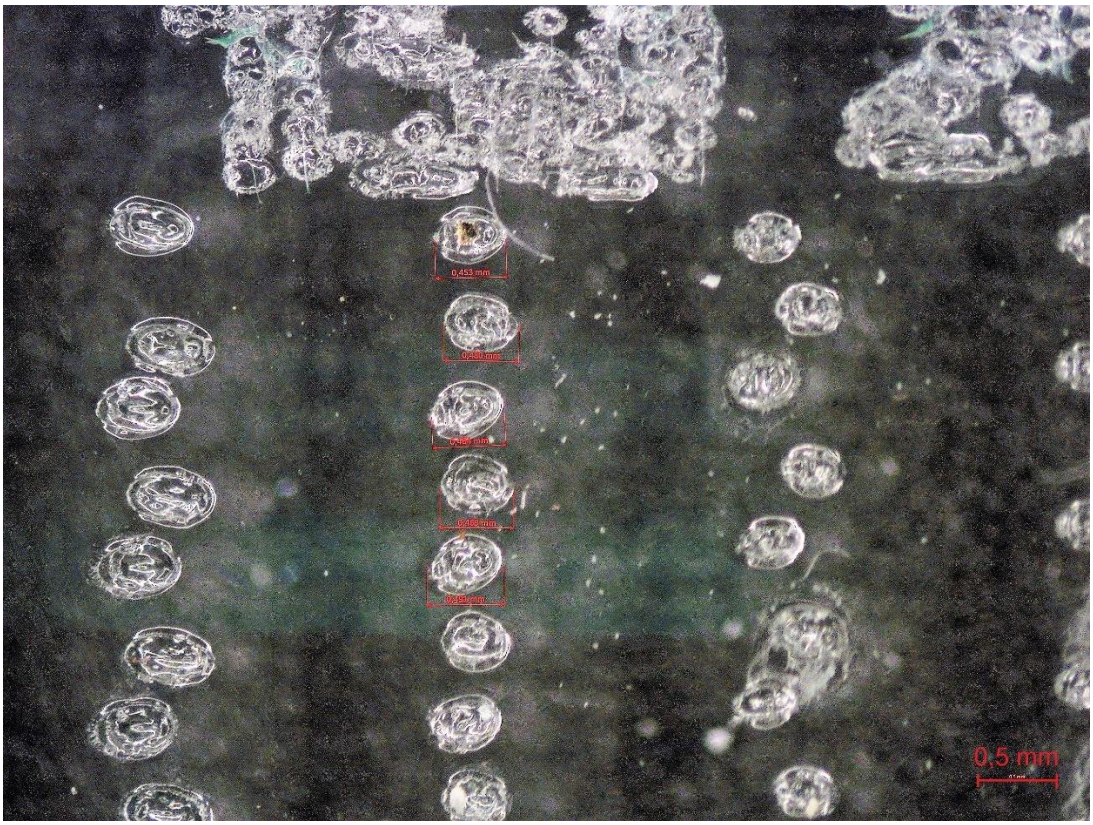
větších nebo rovných mediánu. Pro nalezení mediánu daného souboru stačí hodnoty seřadit podle velikosti a vzít hodnotu, která se nalézá uprostřed seznamu. Pokud má soubor sudý počet prvků, obvykle se za medián označuje aritmetický průměr hodnot na místech n/2 a n/2+1.

Zaznamenané hodnoty byly pro zvýšení přehlednosti zaneseny i do grafu. Jako vhodný graf byl zvolen krabicový graf neboli boxplot. V popisné statistice je tento typ grafu jeden ze způsobů grafické vizualizace numerických dat pomocí jejich kvartilů. Skládá se ze střední „krabicové“ části, která je shora ohraničena 3. kvartilem a zespodu 1. kvartilem. Mezi nimi se nachází linie vymezující medián a jeden bod, který znázorňuje aritmetický průměr hodnot. Grafy také často obsahují linie vycházející ze střední části diagramu kolmo nahoru a dolů, což jsou takzvané vousy, které vyjadřující variabilitu dat pod prvním a nad třetím kvartilem. Odlehlé hodnoty pak mohou být vykresleny jako jednotlivé body.

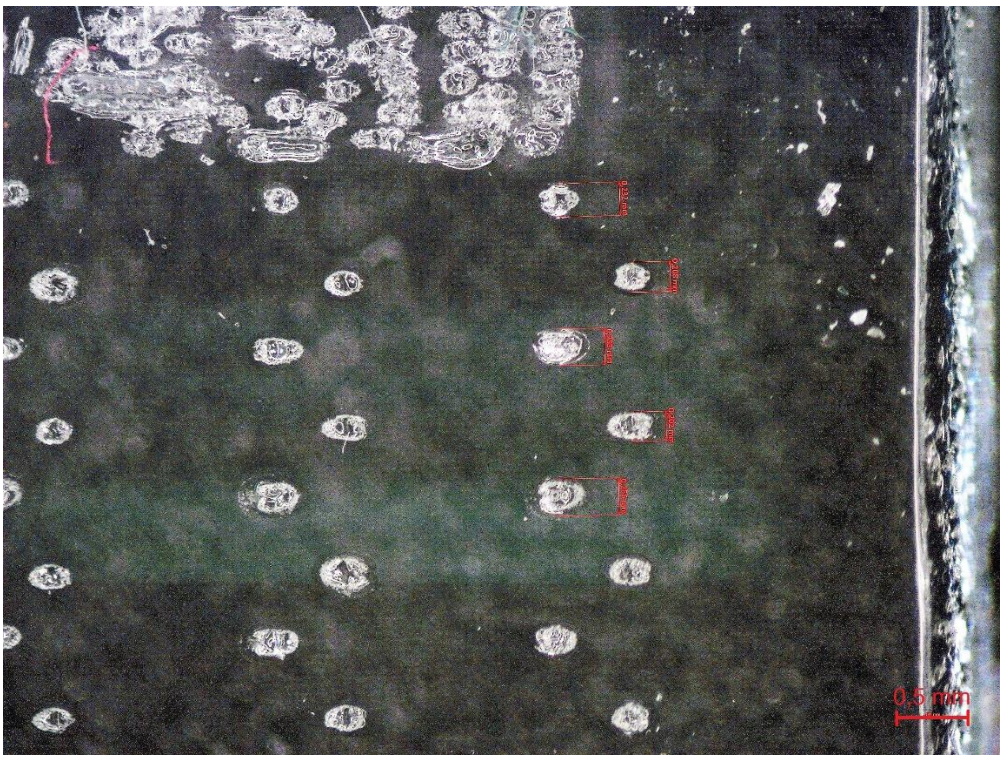
2.3.1 Měření šířky a výšky bodů

Jako první bylo uskutečněno měření velikostí jednotlivých bodů po interakci laserového paprsku s materiálem. Toto měření bylo důležité nikoliv pro určení korekcí, ale pro správné nastavení hodnoty scan gap.

Velikosti bodů pro jednotlivé rychlosti se liší, proto bylo nutné provést sérii měření pro každou rychlost zvlášť. Jako vzorky pro měření byly zvoleny první a desátý vzorek a z těchto vzorků pro každou rychlost bylo zvoleno 5 bodů, které se jevily jako neporušené a od pohledu dobře ohraničené. To vytvořilo dostatek dat pro následné statistické vyhodnocení velikosti bodů jak v ose x (viz obr. 34), tak i v ose y (viz obr. 35).



Obr. 34 Příklad výstupu z mikroskopu – šířka bodů za rychlosti posuvu 150 mm·s^{-1}.



Obr. 35 Příklad výstupu z mikroskopu – výška bodů za rychlosti posuvu 500 mm·s^{-1}.

Tab. 3 Rozměry měřených bodů na vzorku 1.

1. vzorek 50 mm·s^{-1}		**1. vzorek 100 mm·s^{-1}**		**1. vzorek 150 mm·s^{-1}**		**1. vzorek 200 mm·s^{-1}**		**1. vzorek 250 mm·s^{-1}**	
šířka [mm]	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**
0,555	0,402	0,507	0,394	0,453	0,380	0,439	0,340	0,456	0,324
0,521	0,456	0,550	0,385	0,480	0,380	0,437	0,342	0,431	0,305
0,561	0,483	0,537	0,418	0,464	0,394	0,477	0,402	0,453	0,329
0,572	0,445	0,580	0,402	0,469	0,404	0,428	0,353	0,439	0,318
0,572	0,472	0,577	0,431	0,491	0,399	0,426	0,342	0,466	0,323
1. vzorek 300 mm·s^{-1}		**1. vzorek 350 mm·s^{-1}**		**1. vzorek 400 mm·s^{-1}**		**1. vzorek 450 mm·s^{-1}**		**1. vzorek 500 mm·s^{-1}**	
šířka [mm]	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**
0,429	0,297	0,415	0,270	0,426	0,291	0,407	0,264	0,321	0,251
0,410	0,267	0,421	0,270	0,439	0,353	0,364	0,310	0,372	0,248
0,412	0,308	0,404	0,280	0,450	0,329	0,391	0,248	0,367	0,275
0,407	0,302	0,407	0,297	0,421	0,324	0,364	0,251	0,402	0,297
0,426	0,302	0,434	0,329	0,407	0,272	0,375	0,262	0,350	0,264

Tab. 4 Rozměry měřených bodů na vzorku 10.

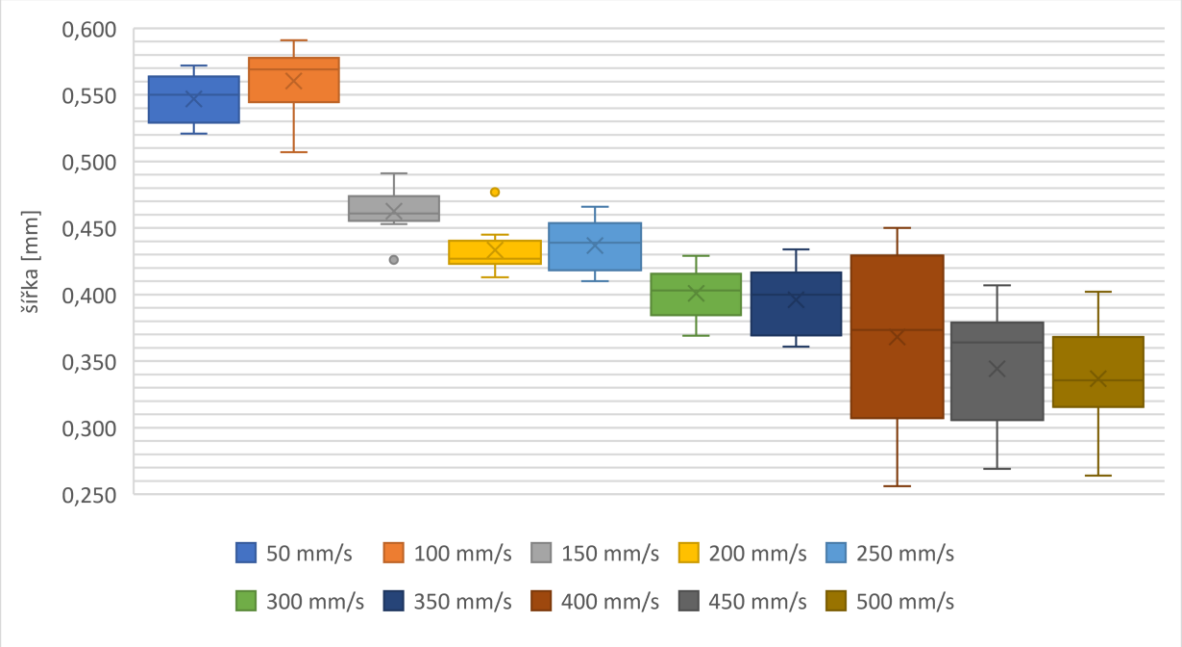
10. vzorek 50 mm·s^{-1}		**10. vzorek 100 mm·s^{-1}**		**10. vzorek 150 mm·s^{-1}**		**10. vzorek 200 mm·s^{-1}**		**10. vzorek 250 mm·s^{-1}**	
šířka [mm]	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**
0,531	0,448	0,577	0,361	0,458	0,369	0,445	0,307	0,439	0,297
0,523	0,480	0,566	0,377	0,426	0,367	0,413	0,326	0,410	0,286
0,534	0,504	0,547	0,359	0,456	0,356	0,423	0,321	0,410	0,297
0,556	0,491	0,572	0,372	0,458	0,369	0,424	0,337	0,442	0,280
0,545	0,499	0,591	0,375	0,472	0,367	0,423	0,318	0,421	0,286
10. vzorek 300 mm·s^{-1}		**10. vzorek 350 mm·s^{-1}**		**10. vzorek 400 mm·s^{-1}**		**10. vzorek 450 mm·s^{-1}**		**10. vzorek 500 mm·s^{-1}**	
šířka [mm]	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**	**šířka [mm]**	**výška [mm]**
0,369	0,281	0,391	0,227	0,334	0,210	0,269	0,191	0,299	0,323
0,391	0,286	0,361	0,197	0,340	0,248	0,278	0,183	0,264	0,208
0,386	0,291	0,361	0,227	0,310	0,183	0,364	0,197	0,345	0,253
0,399	0,283	0,396	0,270	0,256	0,191	0,315	0,186	0,321	0,202
0,380	0,294	0,372	0,213	0,299	0,235	0,315	0,221	0,326	0,256

Při zpracovávání dat z tab. 3 a 4 byla vždy spojena data pro šířku, respektive výšku bodů jednotlivých rychlostí posuvu ze vzorku 1. a 10. Následně byl vypočítán aritmetický průměr, rozptyl, směrodatná odchylka a určen medián, minimální a maximální naměřená hodnota vždy pro šířku, respektive výšku bodu každé rychlosti.

Tab. 5 Zpracovaná data z naměřených hodnot z tab. 4 a 3

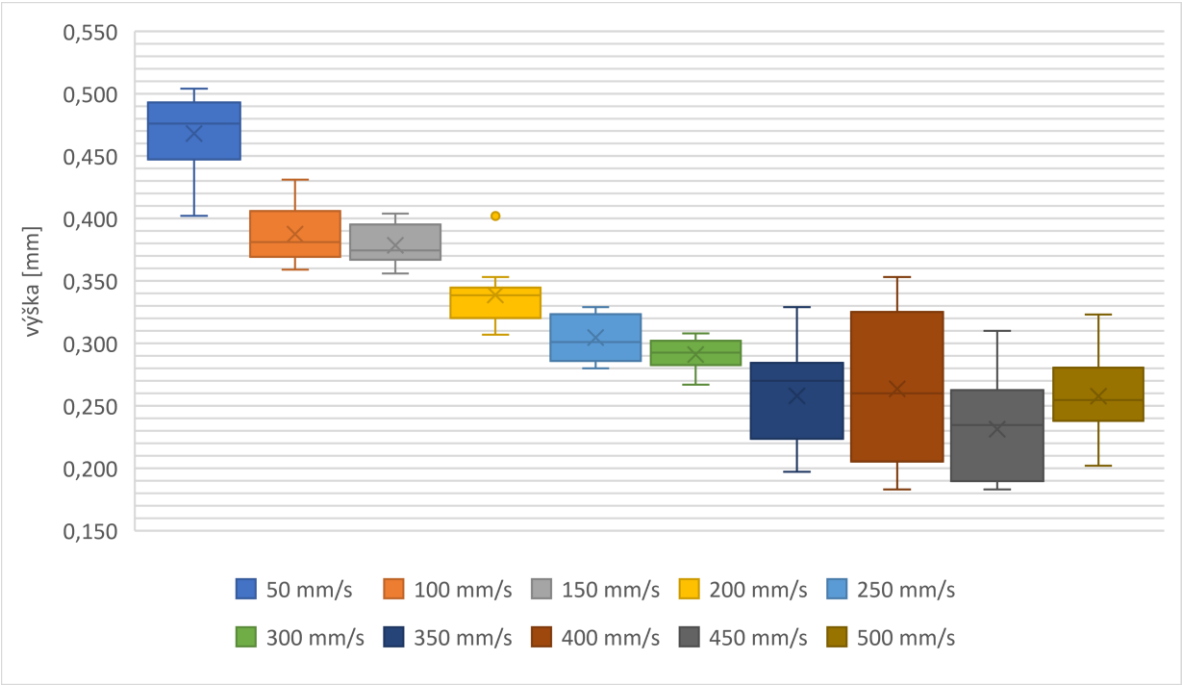
Rychlost posuvu [mm·s^{-1}]		Aritmetický průměr – $\bar{x}$ [mm]	Minimální hodnota – x_{min} [mm]	Maximální hodnota – x_{max} [mm]	Medián – $\tilde{x}$ [mm]	Rozptyl – σ^2 [-]	Směrodatná odchylka – σ [-]
50	šířka	0,547	0,521	0,572	0,550	0,00036	0,01809
	výška	0,468	0,402	0,504	0,476	0,00096	0,02933
100	šířka	0,560	0,507	0,591	0,569	0,00064	0,02393
	výška	0,387	0,359	0,431	0,381	0,00057	0,02259
150	šířka	0,463	0,426	0,491	0,461	0,00031	0,01661
	výška	0,379	0,356	0,404	0,375	0,00025	0,01505
200	šířka	0,434	0,413	0,477	0,427	0,00032	0,01698
	výška	0,339	0,307	0,402	0,339	0,00068	0,02479
250	šířka	0,437	0,410	0,466	0,439	0,00036	0,01800
	výška	0,305	0,280	0,329	0,301	0,00032	0,01704
300	šířka	0,401	0,369	0,429	0,403	0,00038	0,01855
	výška	0,291	0,267	0,308	0,293	0,00015	0,01158
350	šířka	0,396	0,361	0,434	0,400	0,00063	0,02380
	výška	0,258	0,197	0,329	0,270	0,00168	0,03892
400	šířka	0,368	0,256	0,450	0,394	0,00467	0,06486
	výška	0,264	0,183	0,353	0,260	0,00360	0,05696
450	šířka	0,344	0,269	0,407	0,364	0,00222	0,04472
	výška	0,231	0,183	0,310	0,235	0,00180	0,04020
500	šířka	0,337	0,264	0,402	0,336	0,00155	0,03740
	výška	0,258	0,202	0,323	0,255	0,00132	0,03447

Naměřené hodnoty lze pro lepší orientaci zobrazit v krabicovém grafu zvláště pro šířku (viz obr. 36) a výšku (viz obr. 37).



Obr. 36 Krabicové grafy pro šířku bodů za jednotlivých rychlostí posuvů.

Z tabulek i grafu lze vyčíst, že data naměřených šířek byla naměřena pro rychlosti posuvu do a včetně 350 mm·s^{-1} s podobnou přesností. Pro rychlosti posuvu 400 mm·s^{-1} až 500 mm·s^{-1} lze pozorovat horší přesnost při měření vzorků. U rychlosti posuvu 450 mm·s^{-1}, je možné si všimnout, že hodnota mediánu a vypočítaná aritmetická hodnota se liší největším rozdílem ze všech rychlostí posuvu. Horší přesnost měření může být způsobena nevhodným výběrem jednotlivých bodů, protože body se s narůstající hodnotou posuvu zmenšovaly a byly hůře rozeznatelné jejich hranice. Obecně však lze vypozorovat nepřímá úměra mezi šířkou jednotlivých bodů a rychlostí posuvu.



Obr. 37 Krabicové grafy pro výšku bodů za jednotlivých rychlostí posuvů.

Opět je možné zpozorovat trend zhoršení přesnosti měření u vyšších rychlostí posuvů. Citelně největší rozptyl je u měření bodů, které vznikly rychlostí posuvu 400 mm·s^{-1}. Důvody k horší přesnosti měření nejspíše budou podobné jako u měření výšky bodů. Samozřejmě jak šířka, tak výška bodů se se vzrůstající rychlostí posuvu zmenšuje.

Ze získaných dat ohledně výšky bodů je možné určit maximální hodnotu scan gap tak, aby body na sebe plynule navazovaly a nebyly mezi nimi zbytečné mezery, které by mohly kazit dojem z výsledného gravírovaného povrchu. Jako maximální hodnota scan gapu pro každou rychlost byla zvolena hodnota, která se nacházela „někde mezi“ hodnotami aritmetického průměru a mediánem. Scan gap se však do programu LaserCAD dá vložit pouze s přesností na setiny mm, takže v mnoha případech muselo dojít zaokrouhlení.

Tab. 6 Určené hodnoty scan gap pro jednotlivé rychlosti posuvu.

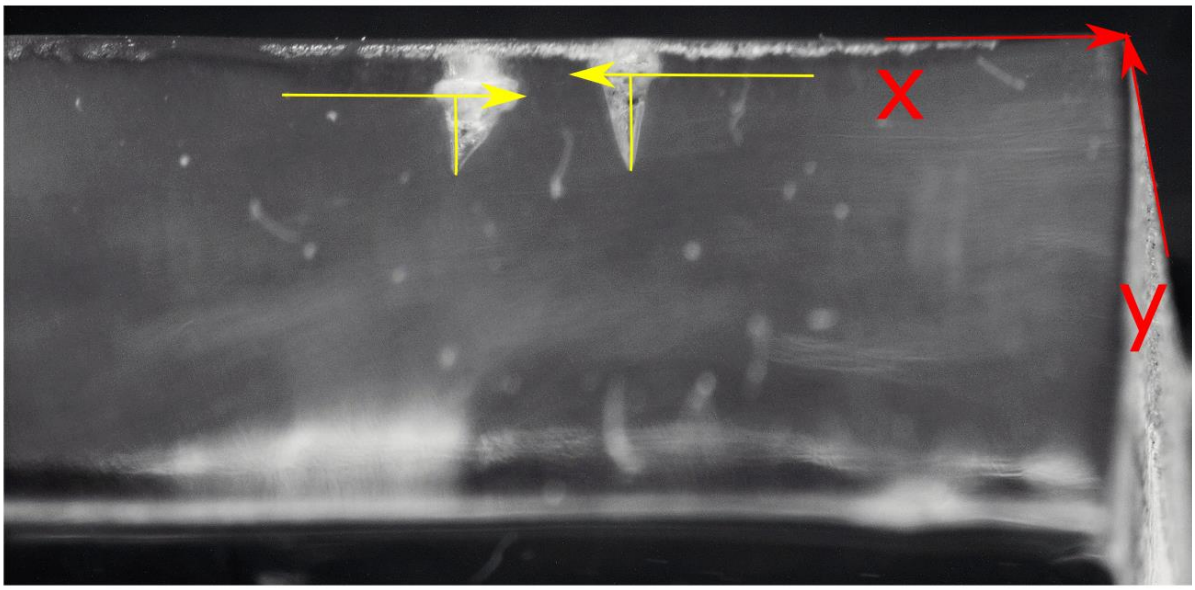
Rychlost posuvu [mm·s^{-1}]	**Scan gap [mm]**
50	0,47
100	0,38
150	0,38
200	0,34
250	0,30
300	0,29
350	0,26
400	0,26
450	0,23
500	0,26

Při pohledu na určené hodnoty scan gap je možné pozorovat zhoršenou přesnost měření u vyšších rychlostí posuvů. Konkrétně u hodnoty scan gap pro rychlost 500 mm·s^{-1} je možné pozorovat nárůst hodnoty o 3 tisíciny milimetru. Něco takového by se v případě ideálního měření stát nemělo, ale při měření má slovo i lidský faktor, kvůli kterému měření ideální být nemůže. Není možné s jistotou určit, zda je chyba konkrétně u rychlosti posuvu 500 mm·s^{-1} nebo pomalejších posuvů.

2.3.2 Měření korekcí

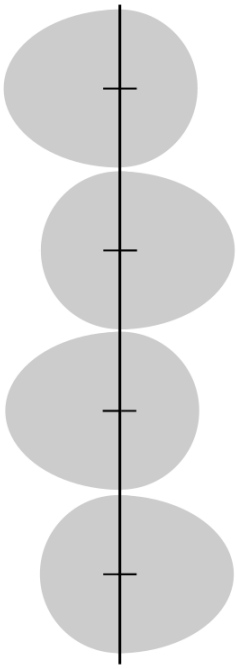
Pro určení korekcí bylo nutno pořídit nové snímky na mikroskopu. Snímky byly pořizovány takovým způsobem, aby bylo možné vést tečnou přímku všemi body, které byly pod sebou, tedy těmi body, které byly v rámci jedné rychlosti gravírovány při pohybu laserové hlavy stejným směrem. Pro každou rychlost byly získány dvě přímky, u kterých následně byla měřena vzdálenost mezi nimi. Při umístění tečné přímky musel být mnohdy zvolen lehký kompromis, a ne u každého bodu byla přímka vedena tečně, protože ne všechny body srovnané pod sebou měly jasně definovanou hranici.

Metoda vedení tečny přes body pod sebou byla zvolena na úkor metody vedení přímky skrze středy gravírovaných bodů pod sebou. Sice se zde muselo pracovat s již zmíněným kompromisem, na druhou stranu však měření bylo méně komplikované, a to z důvodu, že střed každého bodu, tedy místo kontaktu laserového paprsku s materiálem, je vždy lehce vychýleno do strany v závislosti na tom, kterým směrem se laserová hlava pohybovala (viz obr. 38).



Obr. 38 Detail na propaly v materiálu od laseru (pohled z boku).

Při zvolení korekcí tak, aby byly tyto středy bodů v jedné rovině by v konečném důsledku body nebyly seřazeny v jedné řadě pod sebou, ale stále by byly střídavě vybočeny do jedné a druhé strany, jako je to znázorněno na obrázku 39.



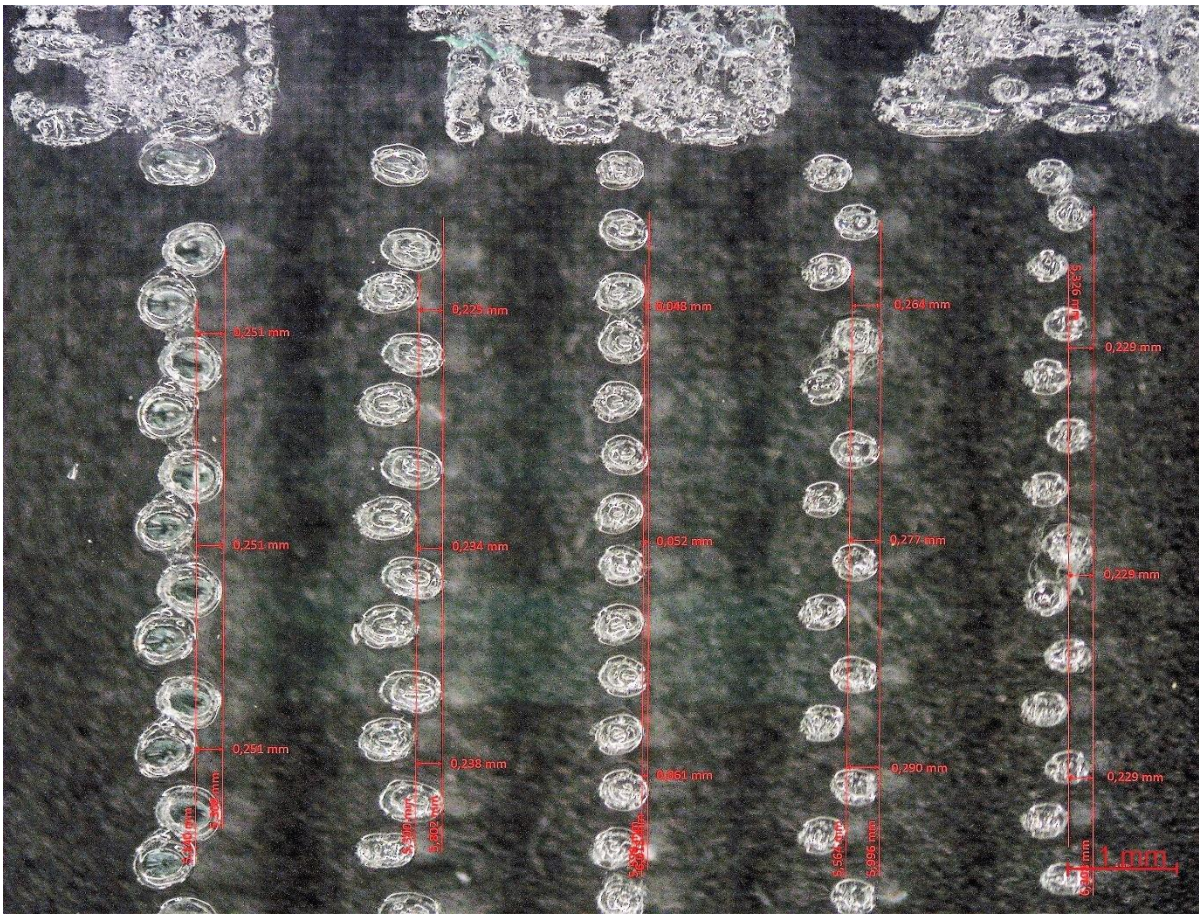
Obr. 39 Znázornění zarovnání podle středů bodů.

Pro ověření skutečnosti vychýlení středů jednotlivých bodů, bylo nutné vyrobit speciální vzorek. Tento vzorek z čirého plexiskla byl o rozměrech pouze 10 mm na 10 mm a ve vzdálenosti 1 mm od jedné z jeho hran byly vygravírovány dva body. Jeden při pohybu laserové hlavy ve směru osy x a druhý při pohybu laserové hlavy na druhou strany. Takto malé rozměry byly nutné pro to, aby se vzorek mohl na výšku postavit pod mikroskop a mohl se pořídit snímek kolmo na gravírovaný povrh. Před zkoumáním na mikroskopu však bylo nutné seříznutou hranu

laserem vybrousit smirkovým papírem se zrnitostí P800 a následně ještě vyleštit diamantovými leštícími pastami (viz obr. 40).

Obr. 40 Diamantová leštící pasta.

Jak již bylo zmíněno, pro každou rychlost byly vedeny dvě tečné přímky a následně byla měřena vzdálenost mezi nimi. Aby bylo ověřeno, že body jsou propojeny přímkou, která tečně navazuje na hodnocené body, tak byly provedeny tři měření pro každou rychlost (viz obr. 41). Vzhledem k počtu 10 vzorků to dává celkově 30 hodnot vzdáleností, což je již hodnotný počet dat pro vyhodnocení a určení správné korekce.



Obr. 41 Ukázka měření korekcí.

V ideálním případě měření by hodnoty každého vzorku pro danou rychlost měly být totožné. Vlivem nepřesností v měření se tak nestalo, a proto musely být hodnoty z tab. 7 statisticky zpracovány.

Tab. 7 Hodnoty naměřených korekcí pro jednotlivé rychlosti.

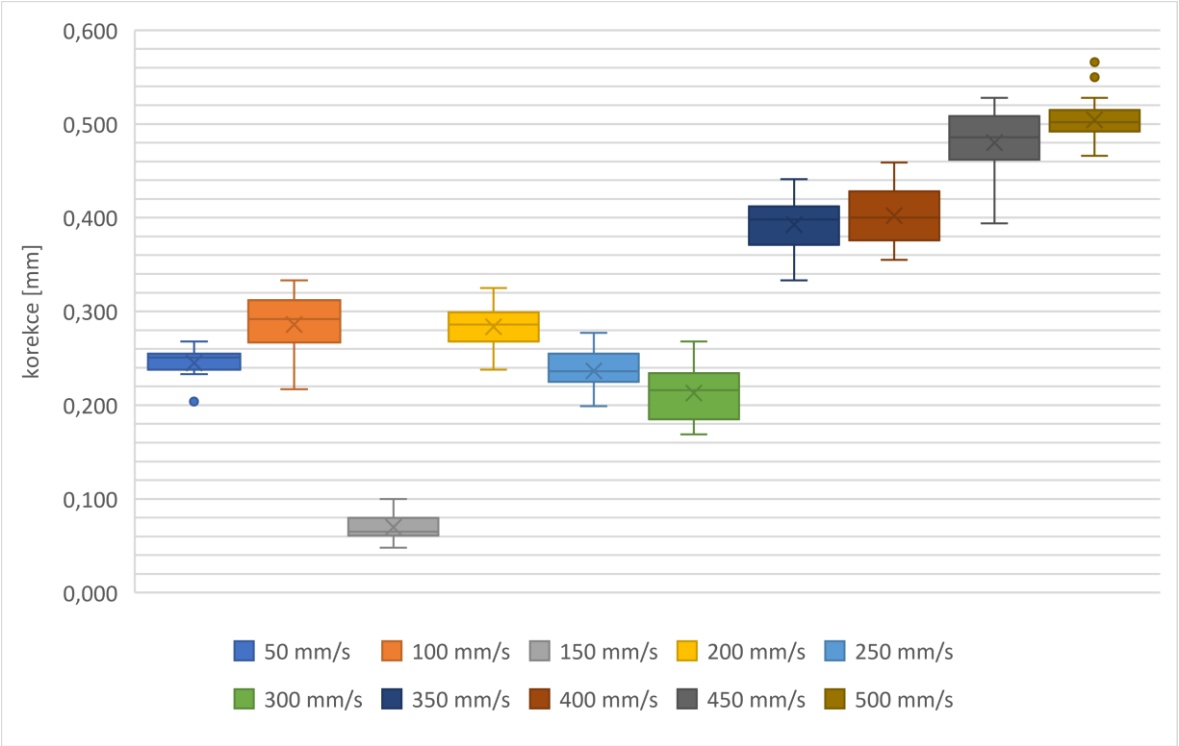
číslo vzorku a měření	**korekce [mm] pro při rychlosti posuvu [mm·s^{-1}]**									
	50	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**	**450**	**500**
1.1	0,207	0,217	0,083	0,259	0,228	0,252	0,400	0,442	0,487	0,473
1.2	0,204	0,224	0,079	0,273	0,214	0,242	0,394	0,428	0,487	0,469
1.3	0,204	0,235	0,059	0,286	0,207	0,235	0,380	0,414	0,487	0,466
2.1	0,251	0,225	0,048	0,264	0,229	0,212	0,368	0,359	0,394	0,489
2.2	0,251	0,234	0,052	0,277	0,229	0,216	0,376	0,359	0,398	0,493
2.3	0,251	0,238	0,062	0,290	0,229	0,221	0,389	0,355	0,402	0,489
3.1	0,233	0,264	0,061	0,294	0,199	0,182	0,411	0,428	0,498	0,511
3.2	0,255	0,268	0,061	0,290	0,203	0,182	0,415	0,415	0,480	0,498
3.3	0,251	0,273	0,061	0,286	0,208	0,182	0,420	0,402	0,480	0,493
4.1	0,251	0,303	0,069	0,277	0,277	0,169	0,415	0,459	0,489	0,510
4.2	0,255	0,294	0,065	0,294	0,264	0,169	0,420	0,454	0,480	0,506
4.3	0,251	0,290	0,061	0,299	0,264	0,177	0,407	0,428	0,485	0,493
5.1	0,268	0,307	0,056	0,238	0,229	0,229	0,441	0,411	0,463	0,566
5.2	0,260	0,312	0,069	0,255	0,242	0,229	0,433	0,376	0,459	0,558
5.3	0,264	0,312	0,069	0,268	0,255	0,225	0,424	0,363	0,455	0,550
6.1	0,268	0,277	0,061	0,277	0,234	0,238	0,398	0,441	0,446	0,528
6.2	0,264	0,290	0,061	0,273	0,238	0,234	0,398	0,428	0,472	0,511
6.3	0,255	0,303	0,061	0,268	0,242	0,229	0,389	0,420	0,498	0,506
7.1	0,238	0,286	0,082	0,268	0,225	0,216	0,333	0,398	0,515	0,476
7.2	0,234	0,286	0,069	0,255	0,238	0,203	0,347	0,385	0,506	0,493
7.3	0,234	0,290	0,065	0,255	0,255	0,186	0,346	0,372	0,502	0,506
8.1	0,238	0,312	0,095	0,312	0,268	0,186	0,411	0,394	0,528	0,519
8.2	0,242	0,311	0,100	0,299	0,260	0,182	0,394	0,394	0,523	0,502
8.3	0,251	0,311	0,100	0,299	0,251	0,186	0,372	0,398	0,515	0,493
9.1	0,242	0,312	0,065	0,299	0,212	0,216	0,407	0,415	0,515	0,515
9.2	0,251	0,320	0,065	0,299	0,225	0,212	0,402	0,407	0,524	0,519
9.3	0,247	0,333	0,065	0,290	0,242	0,203	0,402	0,394	0,519	0,515
10.1	0,238	0,316	0,078	0,325	0,229	0,268	0,368	0,394	0,446	0,485
10.2	0,242	0,316	0,082	0,320	0,247	0,255	0,363	0,376	0,467	0,498
10.3	0,247	0,320	0,091	0,316	0,255	0,247	0,350	0,359	0,485	0,502

Při zpracovávání dat z tab. 7 bylo vycházeno ze všech 30 hodnot pro každou rychlost posuvu. Následně byl vypočítán aritmetický průměr, rozptyl, směrodatná odchylka a určen medián, minimální a maximální naměřená hodnota vždy pro každou rychlost posuvu.

Tab. 8 Zpracovaná data z naměřených hodnot z tab. 7

Rychlost posuvu [mm·s^{-1}]	**Aritmetický průměr – $\bar{x}$ [mm]**	**Minimální hodnota – x_{min} [mm]**	**Maximální hodnota – x_{max} [mm]**	**Medián – $\tilde{x}$ [mm]**	**Rozptyl – σ^2 [-]**	**Směrodatná odchylka – σ [-]**
50	0,245	0,204	0,268	0,251	0,00027	0,01630
100	0,286	0,217	0,333	0,292	0,00112	0,03286
150	0,070	0,048	0,100	0,065	0,00018	0,01336
200	0,284	0,238	0,325	0,286	0,00045	0,02085
250	0,237	0,199	0,277	0,236	0,00042	0,02007
300	0,213	0,169	0,268	0,216	0,00077	0,02724
350	0,392	0,333	0,441	0,398	0,00074	0,02673
400	0,402	0,355	0,459	0,400	0,00085	0,02875
450	0,480	0,394	0,528	0,486	0,00129	0,03534
500	0,504	0,466	0,566	0,502	0,00056	0,02323

Naměřené hodnoty lze pro lepší orientaci zobrazit v krabicovém grafu (viz obr. 42).



Obr. 42 Krabicové grafy pro hodnoty naměřených korekcí.

Při pohledu na zpracované hodnoty může být konstatováno, že hodnoty naměřených korekcí pro všechny rychlosti posuvu jsou naměřeny s podobnou přesností. Nejlépe se přitom jeví korekce při rychlosti 150 mm·s^{-1}. Následně na základě aritmetického průměru a střední hodnotě

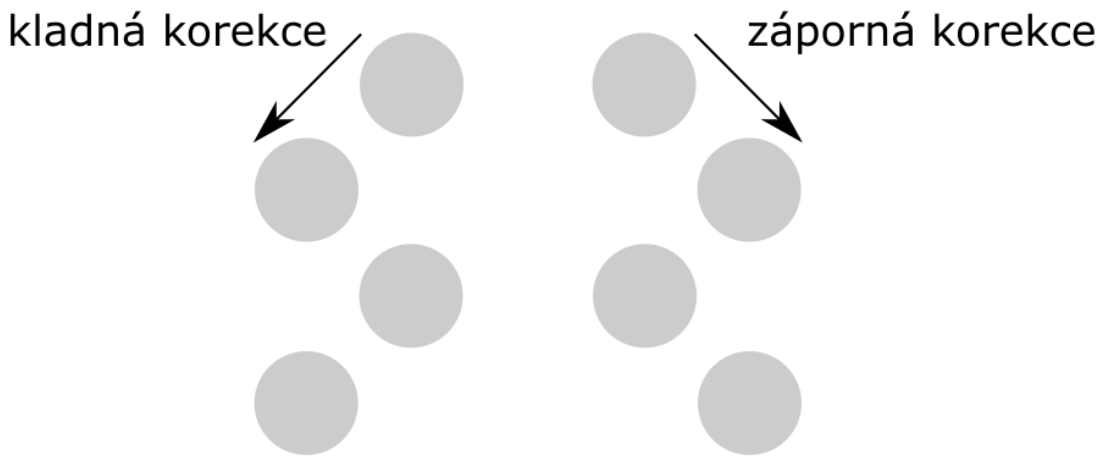
byla určena korekce pro každou rychlost posuvu. Do systému LaserCAD lez korekce zavádět pouze s přesností na setiny mm, hodnoty korekce se tedy musely zaokrouhlit.

Tab. 9 Určené hodnoty korekcí pro jednotlivé rychlosti posuvu.

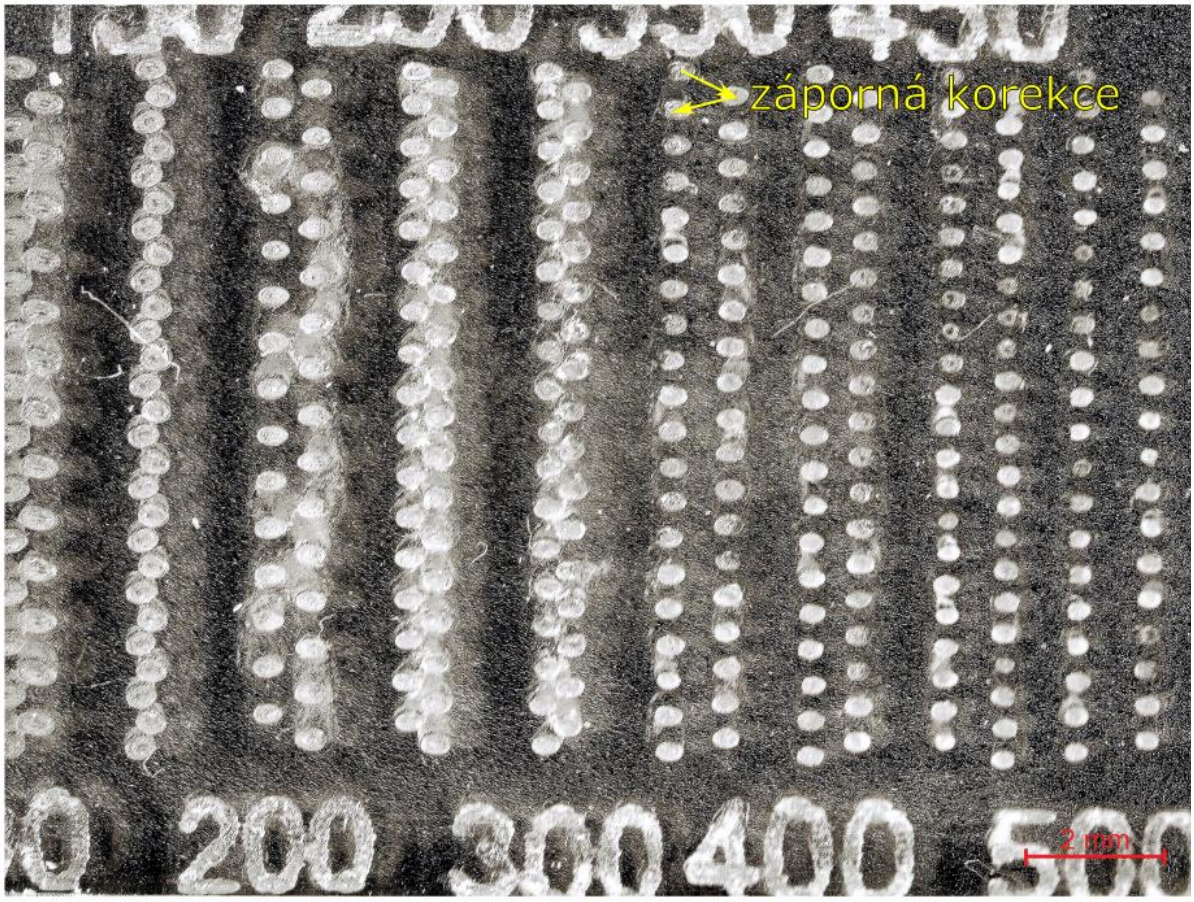
Rychlost posuvu [mm·s^{-1}]	**Korekce [mm]**
50	0,25
100	0,29
150	0,07
200	0,28
250	0,24
300	0,21
350	0,39
400	0,40
450	0,48
500	0,50

Hodnoty korekcí z tab. 9 byly zavedeny do systému LaserCAD. Kvůli neznalosti znaménkové konvence bylo nutné si první odzkoušet, zda korekce zavádět do systému v plusové nebo mínusové hodnotě. Bylo však jasné, že u všech korekcí budou hodnoty buď všechny kladné nebo všechny záporné, jelikož druhý bod v pořadí byl u všech rychlostí posuvu odskočený vždy doprava, tedy po směru osy x.

Hodnoty korekcí byly do systému zadány v kladné hodnotě. Toto rozhodnutí se nakonec ukázalo jako nesprávné, jelikož vzdálenost mezi tečnými přímkami jednotlivých rychlostí posuvu ještě narostla. Po tomto pokusu bylo tedy možné konstatovat, že v případě, že druhý bod je posunutý na ose x do kladného směru, je nutné zadat korekci v záporné hodnotě (viz obr. 43 a 44).

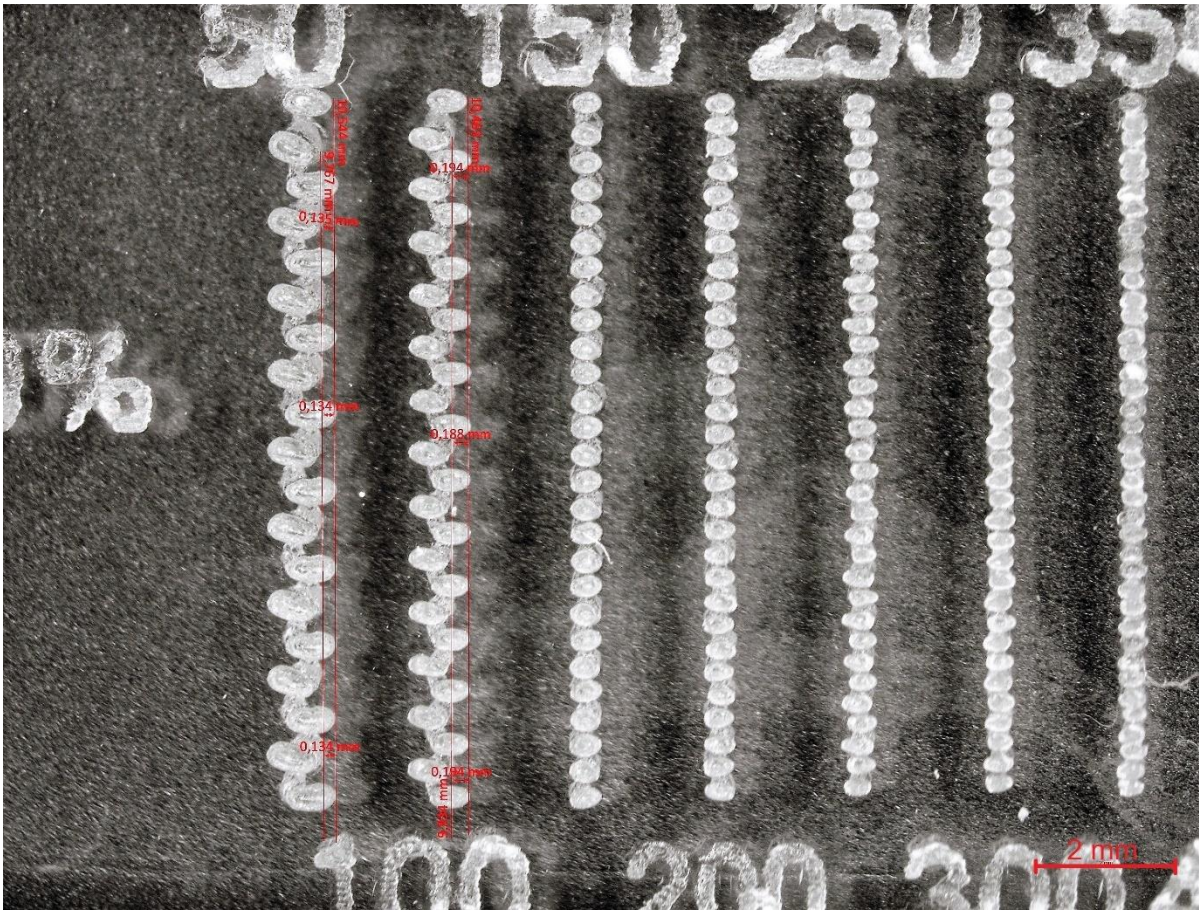


Obr. 43 Příklad, kdy se zadává kladná a kdy záporná korekce



Obr. 44 Ukázka vzorku s korekcí zadanou s opačnou znaménkovou konvencí.

Po zadání korekcí se záporným znaménkem se objevil nový problém, a to nepřesnost u rychlostí posuvu 50 a 100 mm·s^{-1}. Tento problém se projevil posunutím v pořadí druhého bodu tak daleko proti směru osy x, že bylo nutné opět změřit vzdálenost tečných přímek a korekci razantně zmenšit (viz obr. 45). Při zkoumání, jak mohlo k této chybě dojít bylo nutné odmítnout chybu měření, jelikož u všech vzorků byly získány podobné hodnoty. Mikroskop také musel být nastavený správně, jelikož u všech ostatních rychlostí posuvu se tak velká chyba neopakovala. Byl tedy následně vytvořen nový vzorek s vypnutými korekcemi jen pro rychlost 50 a 100 mm·s^{-1}. Tento vzorek nebyl již zkoumán pod mikroskopem, ale oskenován kancelářským skenerem a následně podle měřítka v grafickém programu Inkscape bylo zjištěno, že korekce by měla vycházet asi 0,120 mm pro rychlost posuvu 50 mm·s^{-1}, respektive 0,100 mm pro rychlost posuvu 100 mm·s^{-1}. Výsledek tohoto měření nabídl možnost, že při gravírování prvních 10 vzorků byla u rychlostí posuvu 50 a 100 mm·s^{-1} omylem zanechána korekce, na které bylo zkoušeno, jak se stroj zachová při jejich aplikaci do systému. Aby mohla být tato hypotéza potvrzena, bylo nutné provést sérii měření alespoň tří vzorků s již dříve určenou korekcí 0,250 mm pro rychlost posuvu 50 mm·s^{-1}, respektive 0,290 mm pro rychlost posuvu 100 mm·s^{-1}. U těchto vzorků byly opět vedeny tečné přímky kolem bodů a vyhodnotili vzdálenost mezi nimi. Tímto měřením se získalo celkově devět hodnot pro obě rychlosti posuvu, což je dostatek dat pro vyhodnocení.



Obr. 45 Ukázka chybně získané korekce u rychlostí posuvu 50 a 100 mm·s^{-1}.

Tab. 10 Přeměření korekcí pro rychlosti posuvu 50 mm·s^{-1} a 100 mm·s^{-1}.

číslo vzorku a měření	**korekce [mm] pro při rychlosti posuvu**	
	50 mm·s^{-1}	**100 mm·s^{-1}**
11.1	0,134	0,194
11.2	0,127	0,191
11.3	0,134	0,194
12.1	0,134	0,194
12.2	0,134	0,194
12.3	0,134	0,195
13.1	0,135	0,194
13.2	0,134	0,188
13.3	0,134	0,194

Tab. 11 Zpracovaná data z naměřených hodnot z tab. 10

Rychlost posuvu [mm·s^{-1}]	**Aritmetický průměr – $\bar{x}$ [mm]**	**Minimální hodnota – x_{min} [mm]**	**Maximální hodnota – x_{max} [mm]**	**Medián – $\tilde{x}$ [mm]**	**Rozptyl – σ^2 [-]**	**Směrodatná odchylka – σ [-]**
50	0,133	0,127	0,135	0,134	0,000006	0,00226
100	0,193	0,188	0,195	0,194	0,000005	0,00208

Vzhledem k téměř nulovému rozptylu naměřených hodnot je zde zbytečné vytvářet krabicový graf, protože by byl téměř plochý. Můžeme tedy přímo určit opravenou hodnotu korekce a vyhodnotit to s hodnotou získanou z pokusného měření ze skeneru. Pokusné měření nám dávalo hodnotu, která oscilovala okolo 0,120 mm v případě rychlosti posuvu 50 mm·s^{-1}, respektive 0,100 mm u rychlosti posuvu 100 mm·s^{-1}.

Vztah pro výpočet opravené korekce pro rychlost 50 mm·s^{-1}:

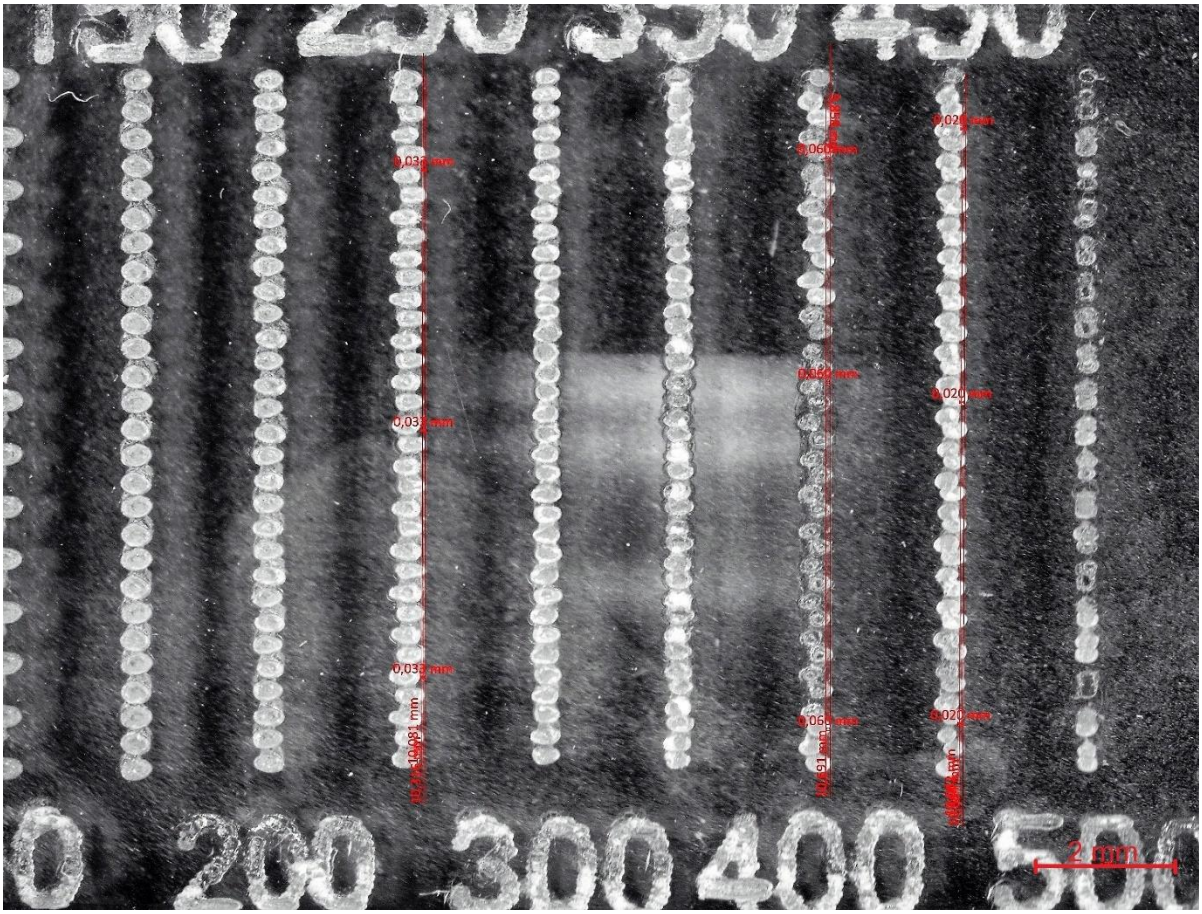
$$opravená\ korekce_{50} = původní\ naměřená\ korekce_{50} - hodnota\ přeměření_{50} \quad (3.4)$$
$$opravená\ korekce_{50} = -0{,}250 + 0{,}133 = -0{,}117\ mm,$$

Vztah pro výpočet opravené korekce pro rychlost 100 mm·s^{-1}:

$$opravená\ korekce_{100} = původní\ naměřená\ korekce_{100} - hodnota\ přeměření_{100} \quad (3.5)$$
$$opravená\ korekce_{100} = -0{,}290 + 0{,}193 = -0{,}097\ mm,$$

Při porovnání opravených korekcí a hodnot naměřených z pokusného měření ze skeneru je možné konstatovat naplnění hypotézy o zapomenutí pokusných korekcí v systému při gravírování prvních 10 vzorků. Tyto zapomenuté korekce by se měly shodovat s přeměřenými hodnotami pro obě rychlosti a byly zadány kladně.

U další rychlostí posuvu od 150 mm·s^{-1} byly korekce vyhodnoceny jako úspěšně určené. Pouze u rychlostí posuvu 250, 400 a 450 mm·s^{-1} bylo při pohledu na snímek z mikroskopu usouzeno, že korekce by se mohla ještě zpřesnit, a tedy bylo provedeno druhé opravné měření, jako v případě u rychlostí 50 a 100 mm·s^{-1} (viz obr. 46).



Obr. 46 Ukázka zpřesňujícího měření korekcí.

Pro zpřesňující měření byly použity tři vzorky jako v případě opravného měření u rychlostí posuvu 50 a 100 mm·s^{-1}. U každého vzorku byly naměřeny tři hodnoty, což nám opět dalo dostatek dat pro vyhodnocení. Byl kladen vysoký důraz na přesnost měření, takže rozptyl jako v případě opravného měření by měl být téměř zanedbatelný.

Tab. 12 Zpřesňující měření korekcí pro rychlosti posuvu 250, 400 a 450 mm·s^{-1}.

číslo vzorku a měření	**korekce [mm] pro při rychlosti posuvu**		
	250 mm·s^{-1}	**400 mm·s^{-1}**	**450 mm·s^{-1}**
11.1	0,033	0,060	0,020
11.2	0,033	0,060	0,020
11.3	0,033	0,060	0,020
12.1	0,033	0,067	0,020
12.2	0,027	0,060	0,020
12.3	0,033	0,060	0,020
13.1	0,033	0,060	0,020
13.2	0,033	0,067	0,020
13.3	0,027	0,067	0,027

Tab. 13 Zpracovaná data z naměřených hodnot z tab. 12

Rychlost posuvu [mm·s^{-1}]	**Aritmetický průměr – $\bar{x}$ [mm]**	**Minimální hodnota – x_{min} [mm]**	**Maximální hodnota – x_{max} [mm]**	**Medián – $\tilde{x}$ [mm]**	**Rozptyl – σ^2 [-]**	**Směrodatná odchylka – σ [-]**
250	0,032	0,027	0,033	0,033	0,000007	0,00249
400	0,062	0,060	0,067	0,067	0,000012	0,00330
450	0,021	0,020	0,027	0,060	0,000005	0,00220

Jak bylo zmíněno, byl kladen vysoký důraz na přesnost měření a není tedy nutné naměřené hodnoty zobrazovat v krabicovém grafu, protože by tyto grafy byly téměř ploché. Může být tedy přímo určena přesnější hodnota korekce na základě jednoduchého výpočtu, kdy se vezmou v potaz původní naměřené korekce a přičtou se k nim hodnoty ze zpřesňujícího měření, jelikož z obrázku 46 lze vidět, že druhý bod je posunutý do záporného směru po ose x. Jako zpřesňující hodnota může být aritmetický průměr z hodnot pro každou rychlost posuvu. Nutnost určit přesnější hodnoty může být považována kvůli nedokonale přesnému měření původních korekcí za zcela přirozený postup.

Vztah pro výpočet přesnější korekce pro rychlost 250 mm·s^{-1}:

$$\begin{aligned} &přesnější\ korekce_{250} = -původní\ naměřená\ korekce_{250} + zpřesňující\ hodnota_{50} \\ &opravená\ korekce_{50} = -0{,}240 + 0{,}032 = -0{,}208\ mm, \end{aligned} \tag{3.6}$$

Vztah pro výpočet přesnější korekce pro rychlost 400 mm·s^{-1}:

$$\begin{aligned} &opravená\ korekce_{400} = -původní\ naměřená\ korekce_{400} + zpřesňující\ hodnota_{400} \\ &opravená\ korekce_{400} = -0{,}400 + 0{,}062 = -0{,}338\ mm, \end{aligned} \tag{3.7}$$

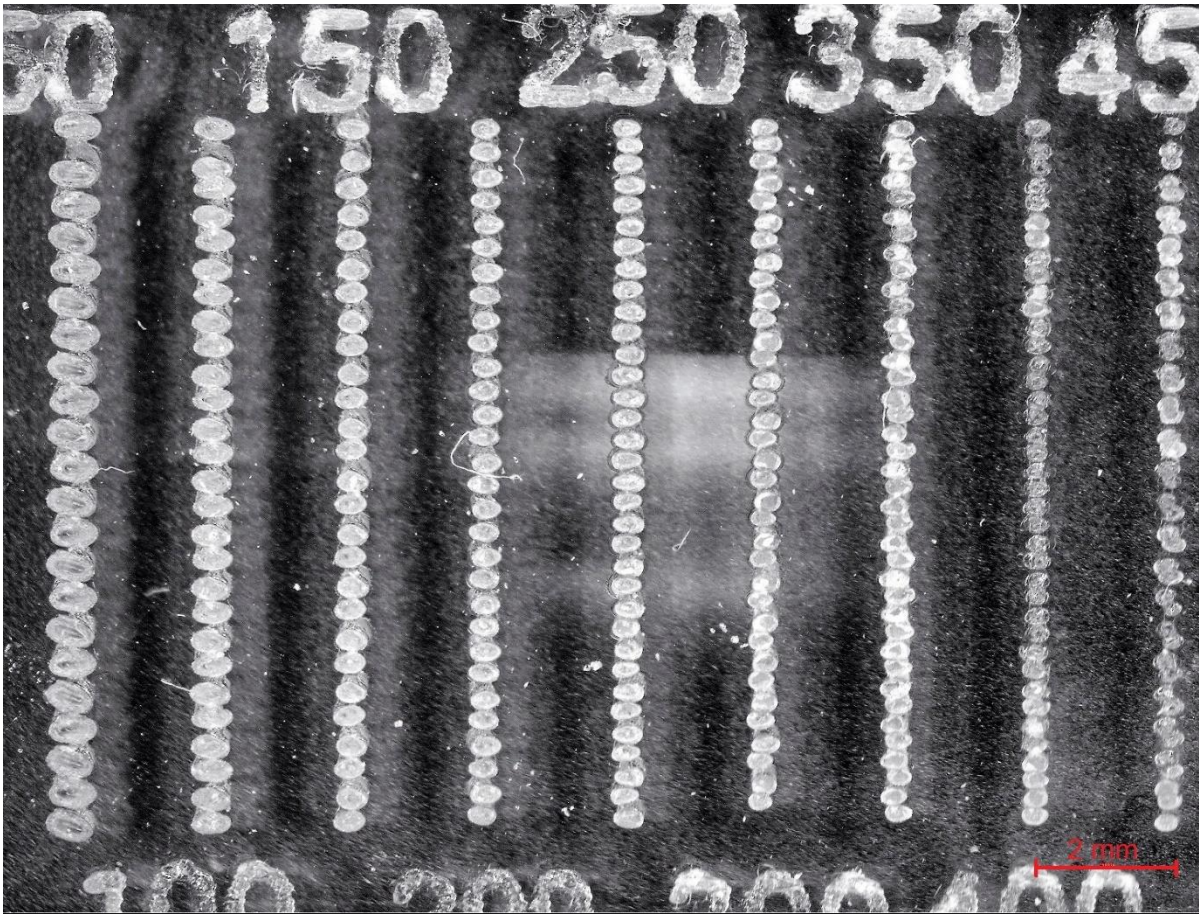
Vztah pro výpočet přesnější korekce pro rychlost 450 mm·s^{-1}:

$$\begin{aligned} &opravená\ korekce_{450} = -původní\ naměřená\ korekce_{450} + zpřesňující\ hodnota_{450} \\ &opravená\ korekce_{450} = -0{,}480 + 0{,}021 = -0{,}459\ mm, \end{aligned} \tag{3.8}$$

Následně můžou být určené finální hodnoty korekcí pro každou rychlost. U rychlostí 50 a 100 mm·s^{-1} bylo nutné opravit počáteční chybu, kdy v systému byla zanechána testovací korekce. U rychlostí posuvu 250, 400 a 450 mm·s^{-1} bylo nutné vlivem nepřesností měření hodnotu korekce lehce upravit dalším měřením a následně zaokrouhlit na setiny milimetrů. Rychlosti posuvu 150, 200, 300, 350 a 500 mm·s^{-1} byly po prozkoumání na mikroskopu hned po prvním měření určeny správně. Výsledek lze vidět na obr. 47 a 48.

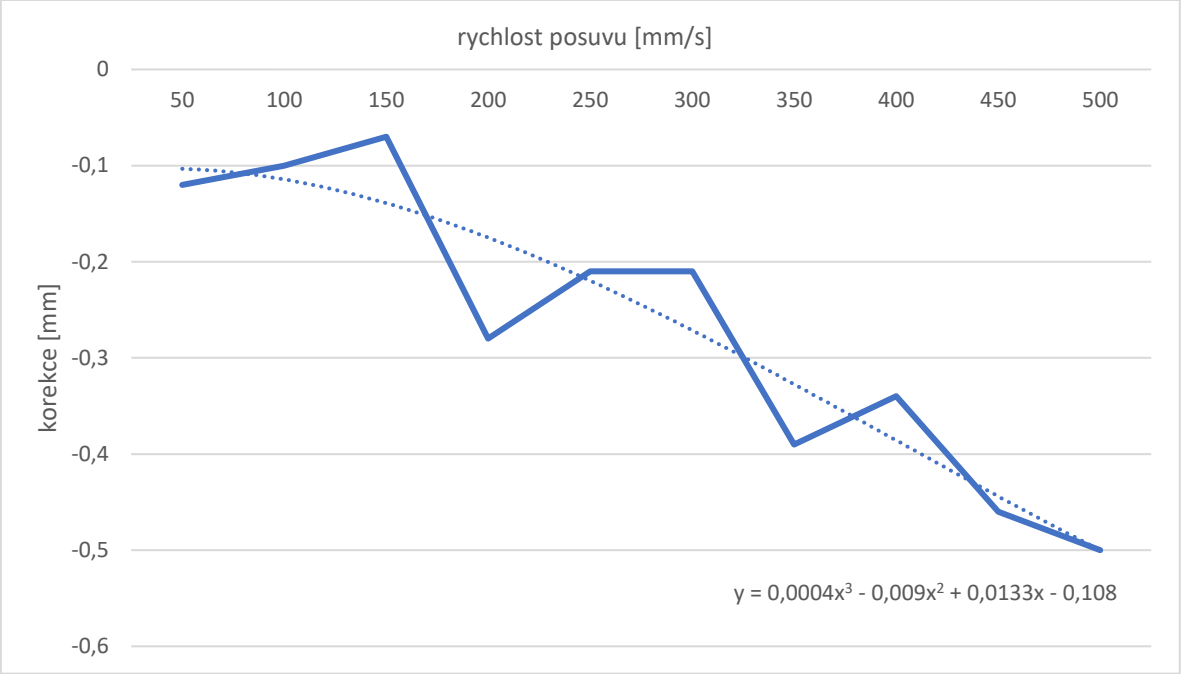
Tab. 14 Finální hodnoty korekcí pro jednotlivé rychlosti posuvu.

Rychlost posuvu [mm·s^{-1}]	**Korekce [mm]**
50	-0,12
100	-0,10
150	-0,07
200	-0,28
250	-0,21
300	-0,21
350	-0,39
400	-0,34
450	-0,46
500	-0,50



Obr. 47 Ukázka vzorku s finálními korekcemi u metody swing.

Jak již bylo zmíněno, čím více hodnot korekcí pro dané rychlosti posuvu je naměřeno, tím přesněji si systém bude moci aproximovat hodnoty korekcí pro neznámé rychlosti posuvu. V tomto případě je krok po 50 mm·s^{-1} od rychlosti posuvu 50 mm·s^{-1} do rychlosti posuvu 500 mm·s^{-1}.



Obr. 48 Graf závislosti rychlosti posuvu na korekci.

2.4 Zhodnocení gravírovaného vzorku

Obr. 49 Vzorek gravírovaný rychlostí posuvu 500 mm·s^{-1}.

Na závěr experimentu byl vygravírován vzorek zobrazený na obrázku 49. Tento vzorek je rozdělen do tří částí. První část v levé třetině je gravírována pomocí módu unilateralism. Lze si všimnout, že gravírovaný povrh je kvalitní a hrany jsou velmi přesně zarovnané. Část uprostřed je gravírovaná metodou swing, u které byly použité v experimentu naměřené korekce. Kvalita gravírovaného povrchu se jeví velmi podobně jako u metody unilateralism. V pravé části je pak gravírovaný povrh metodou swing, ale s vypnutými korekcemi. I bez důkladnějšího zkoumání si lze povšimnout, že gravírovaný povrh je rozmazaný, zvláště citelné je to v případě nápisu „bez korekce“.

3 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Metoda swing primárně šetří dobu samotného procesu gravírování oproti metodě uniteralism. Doba samotného procesu hlavně úzce souvisí s největší nákladovou položkou, a to je náklad na zaměstnance. Nelze však paušálně určit, o kolik je metoda swing v porovnání s metodou unilateralism časově výhodnější. Vždy tento vztah bude záležet na parametrech gravírovaného vzorku. Aby mohl být určen alespoň přibližný poměr mezi gravírování metodou swing a unilateralism, tak bylo v programu LaserCAD vytvořeno deset různých vzorků pro gravírování a byly simulovány pro každý vzorek časy jak metodou swing, tak unilateralism.

Tab. 15 Porovnání časové náročnosti u náhodných vzorků

unilateralism [s]	**swing [s]**	**časová úspora díky metodě swing**
204	506	60 %
202	319	37 %
301	732	59 %
1151	2861	60 %
3298	8567	62 %
109	140	22 %
39	55	29 %
9	20	55 %
3	7	57 %
308	790	61 %
průměrná časová úspora:		50 %

Z tab. 15 lze vypozorovat, že časová úspora je od 22 % do 62 % a v průměru je to okolo 50 %. Je však nutné poznamenat, že těchto deset vzorků bylo pouze gravírováno. Kdyby byly vzorky po stranách odřezány laserem, časová úspora by byla menší, jelikož řezání u obou metod zabere stejné množství času, a tedy časový nepoměř obou metod se zmenší.

Aby bylo možné si kvantifikovat konkrétní úsporu metodou swing, je nutné vytvořit modelový příklad. Pro tyto účely byla zvolena situace, kdy zákazník bude chtít gravírovat popisné štítky na dveře. Štítky by měly mít rozměry 100 mm na 30 mm. V levé části by se nacházelo logo a zbytek prostoru bylo zvoleno jako místo pro číselný popis dané místnosti (viz obr. 50). Takovýchto štítků by se souběžně na při experimentu používaném laserovém stroji dalo udělat 70 kusů. Nechť je tedy poptávka konkrétně na 70 kusů.

Obr. 50 Ukázka štítku.

Tab. 16 Porovnání strojního času u modelového příkladu.

unilateralism [s]	swing [s]	časová úspora díky metodě swing
14074	8701	38 %

Z tab. 16 lze vypozorovat, že časová úspora metodou swing je 38 %. To je méně něž průměrných 50 %, protože se v celkovém čase z modelového příkladu promítlo i řezání, které je u obou metod stejně časově náročné. K těmto časům se však ještě musí připočíst čas manipulace se zakázkou, tedy její příprava a vyjmutí ze stroje. Je možné počítat 5 minut na oba tyto úkony.

Aby se tato doba mohla převést na finanční náklad je nutné si stanovit hrubou mzdu pracovníka obsluhujícího stroj. Obsluha laserového stroje nepotřebuje žádnou speciální kvalifikaci, mzda může být pod hranicí průměrné mzdy, a to 35 000 Kč. Ke hrubé mzdě je potřeba přičíst 24,8 % z hrubé mzdy na sociální pojištění placené zaměstnavatelem a 9 % z hrubé mzdy na zdravotní pojištění placené zaměstnavatelem.

Měsíční náklad na zaměstnance:

$$\begin{aligned} &měsíční\ náklad\ na\ zaměstnance = (1 + 0{,}248 + 0{,}09) \cdot hrubá\ měsíční\ mzda \\ &měsíční\ náklad\ na\ zaměstnance = (1 + 0{,}248 + 0{,}09) \cdot 35000 = 46830\ Kč. \end{aligned} \tag{4.1}$$

Nyní je nutné určit hodinové náklady na zaměstnance. Počet pracovních hodin v měsíci lze určit vynásobením běžné pracovní doby 8 hodin a běžným počtem pracovních dnů v měsíci, tedy 20 dnů. To dává 160 pracovních hodin v měsíci.

Hodinový náklad na zaměstnance:

$$\begin{aligned} &hodinový\ náklad\ na\ zaměstnance = \frac{měsíční\ náklad\ na\ zaměstnance}{počet\ pracovních\ hodin\ v\ měsíci} \\ &hodinový\ náklad\ na\ zaměstnance = \frac{46830}{160} = 292{,}6875\ Kč. \end{aligned} \tag{4.2}$$

Jiná nákladová položka, která se bude lišit u obou metod je spotřeba elektřiny. Laserový stroj má při procesu gravírování příkon asi 400 W. To znamená, že za hodinu provozu spotřebuje asi 0,4 kWh. Průměrná cena za 1 kWh je asi 7,15 Kč (jaro 2022).

Další nákladová položka je materiál. Pro takovouto zakázku by se dala použít tabule plexiskla o rozměrech 500x500x4 mm, která se dá pořídit za 214 Kč bez DPH.

Následující nákladové položky můžou být opět přepočítány na celkový čas strávený zakázkou. Tím je pronájem za prostory, který se v Brně nyní (jaro 2022) pohybuje okolo 100 Kč/m^2 za měsíc. Laserový stroj vyžaduje zhruba 6 m^2. Pravidelná údržba v obou případech vyjde na asi 1000 Kč za měsíc. Pravidelnou údržbou se myslí výměna chladící kapaliny, výměna spotřebních materiálů, seřízení stroje pracovníkem atd. Pořizovací cena stroje je 100000 Kč a jeho životnost je 5 let.

Všechny tyto položky budou přepočítány na sekundový náklad podobně jako v případě nákladu na zaměstnance, aby následně mohly být vynásobeny celkovým časem potřebným na výrobu zakázky jak metodou swing, tak i unilateralism.

Tab. 17 Souhrn všech nákladů přepočítaných na celkovou časovou náročnost zakázky.

Nákladová položka	**Unilateralism**	**Swing**
celková časová náročnost	*14674 s*	*9301 s*
náklad na zaměstnance	1193,03 Kč	756,2 Kč
cena za elektřinu	11,66 Kč	7,39 Kč
cena za materiál	214 Kč	214 Kč
pronájem prostor	15,29 Kč	9,69 Kč
údržba stroje	25,48 Kč	16,15 Kč
pořizovací cena stroje	42,46 Kč	26,91 Kč
celkem	**1501,92 Kč**	**1030,34 Kč**
ušetřeno metodou swing		**471,58 Kč**

Konkrétně u této zakázky lze ušetřit celkově 471,58 Kč. Je však důležité si uvědomit, že proces získání korekcí je velmi časově náročný a uživatel musí důkladně zvážit, zda se mu tento čas vyplatí investovat a přinese mu očekávaný užitek. Korekce se v průběhu používání stroje můžou měnit, a tedy jejich hodnoty nejsou trvalé. Důležité je také zmínit, že laserový stroj vyžaduje pouze úvodní nastavení a pak až následné vyjmutí výrobku. Dokáže tedy celý proces gravírování obstarat bez přičinění uživatele a ten se v mezičase může věnovat jiným činnostem.

ZÁVĚR

Diplomová práce se věnovala laserovým strojům pro gravírování a procesu gravírovaní jako technologické operaci. Praktická část byla zaměřena na procesní parametry, zejména na oblast zpřesňování korekcí při obousměrném gravírování metodou – swing. Pro experimentální měření byly navrženy testovací vzorky, na kterých byla prokázána nepřesnost polohování použitého CO^2 laseru při zpětném pohybu. K této nepřesnosti dochází za předpokladu, že nejsou nastaveny polohovací korekce pro zvolené posuvové rychlosti. V důsledku to znamenalo, že následné gravírované body nebyly zarovnány do pravidelného obrazce a při použití pro produkci docházelo k rozostření výsledného obrazce. Polohové korekce mají za úkol potlačit nepřesnosti při procesu gravírování metodou swing, tedy když laserová hlava gravíruje při pohybu v obou směrech osy x. Tyto nepřesnosti souvisí s kinematikou dynamikou stroje. Řídicí systém stroje umožňuje zadávání korekcí s přesností na 2 desetinná místa. Z toho důvodu bylo nezbytné výsledky zaokrouhlovat. Zvolená metoda pro vyhodnocování odchylek polohování, tedy měření pomoci mikroskopu, do měření vnášela jistou míru chyby, avšak při experimentálním ověření se tato metoda jevila jako dostatečně přesná. Výsledná odchylka se pohybovala pod 1 % naměřeného rozměru. Pro ověření naměřených hodnot byla provedena opakovaná měření dle navržené metodiky pro zpřesnění výsledku.

Metoda swing uživateli laserové stroje primárně šetří čas samotného procesu gravírování. V průměru lze metodou swing ušetřit průměrně 50 % celkového času potřebného na gravírování. I přes to, že je proces získání korekcí časově náročný, je vhodné tyto korekce navrženými metodami získat a pro výrobu používat. Návratnost nákladů související s tímto procesem úzce souvisí s výrobním portfoliem, který je uvažován pro daný stroj. Za předpokladu využití stroje primárně pro gravírování například obrazů do dřeva, plexiskla, kůže, skla a podobných materiálů lze ušetřit až 45 % nákladů na strojní čas. V případě, kdy je stroj uvažován primárně pro řezání a dělení materiálu a gravírování je pouze okrajovou záležitosti, lze proces měření polohovacích korekcí redukovat pouze na nejběžněji používané posuvové rychlosti. Prakticky se pak může jednat například o dvě nejčastěji používané posuvové rychlosti.

Z výsledků měření korekcí lze konstatovat, že se zvyšující se rychlostí posuvu laserové hlavy narůstá i velikost korekce. Zároveň korekce ale nenarůstá lineárně. Pro konkrétní otestování získaných korekcí byl zvolen vzorový výrobek a na něm byly korekce finálně otestovány. Na výrobek byl aplikovaný jeden vzor, rozkopírovaný vedle sebe, a každý reprezentant byl gravírován při jiných podmínkách nastavení polohovacích korekcí. V prvním případě byla použita metoda unilateralism, ve druhém případě metoda swing se získanými korekcemi a třetí způsob bylo gravírování metodou swing bez korekcí. Při gravírování tohoto vzorového výrobku byla použita maximální rychlost posuvu, která byla při experimentu zjišťována, a to rychlost posuvu 500 $mm \cdot s^{-1}$. U této rychlosti posuvu byla naměřena největší korekce, takže byla zvolena proto, aby pouhým okem byl jasně pozorovatelný vliv korekcí na gravírovaný vzorek. Ze vzorku lze vyhodnotit, že rozdíl mezi metodou unilateralism a metodou swing s korekcemi je pouhým okem neznatelný, ale zároveň metoda swing bez korekcí působí rozmazaným dojmem.

V teoretické části této diplomové práci byla věnována pozornost laserové technologii a laserovému gravírování obecně. Zmíněna byla historie, konkrétně vývoj a vzestup laseru, gravírování i laserové gravírování. Dále byla pozornost zaměřena na charakteristiku laserových strojů pro gravírování, popis jejich částí a principu laserové technologie jako takové. Práce zmiňuje vhodné předměty a materiály pro laserové gravírování a také nabízí porovnání laserového gravírování s jinými tradičními metodami mikroobrábění nebo úpravy povrchu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *History of engraving* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.hisour.com/history-of-engraving-51829/
2. *Engraving* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.britannica.com/art/engraving
3. ČERNÝ, Václav. Laser - od objevu k průmyslovým aplikacím [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/laser-od-objevu-k-prumyslovym-aplikacim--13653
4. *Laser* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: 4. https://en.wikipedia.org/wiki/Laser
5. *The Evolution and History of Laser Marking and Engraving* [online]. 05.14.2019 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://permanentmarking.com/laser-education/history-of-laser-marking/
6. *Nekonvenční metody obrábění – 4. díl* [online]. 05.14.2019 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil
7. *SERIÁL NA TÉMA LASERY - ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ* [online]. 19. 02. 2013 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-ajejich-deleni-127
8. ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: http://www.unium.cz/materialy/cvut/fjfi/lasery-a-jejich-aplikace-m9312-p1.html#
9. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. 13.12.2010 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://adoc.pub/laserove-technologie-v-praxi.html
10. ŠIMAN, I. *Využití laserů ve strojírenských technologických aplikacích:* Část 1. Základní princip laseru a jeho interakce s materiálem. Strojírenství. 1989, roč. 39, č. 5, s. 285-298.
11. *Laser processing with CO2 lasers: Technical information* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: http://www.trumpflaser.com/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/DAM/trumpflaser.com/Technische_Infos/TI_Laser_processing_CO2-Lasers.PDF&t=1400488673&hash=be9635ed230655006a9770df370329ee
12. HALLIDAY, David, Robert RESNICK, Jearl WALKER a Petr DUB. *Fyzika. Svazek 1*. 2. přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013, 1 sv. (různé stránkování) : obr., barev. fot., grafy. ISBN 978-80-214-4123-1.
13. SOCHOR, Václav a V SOCHOR. *Lasery a koherentní svazky*. Praha: Academia, 1990, 195 s. ISBN 80-200-0354-1.
14. *Lasery pro průmysl* [online]. 09. 07. 2008 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl
15. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techniky_2013_mrna.pdf
16. BUCHFINK, Gabriela. *Fascination of sheet metal: a material of limitless possibilities.* 1st ed. Würzburg, Germany: Vogel Buchverlag. ISBN 978-383-4330-710.
17. HÁBOVČÍK, Peter. *Lasery a fotodetektory*. Bratislava: Alfa, 1989, 318 s. : il. ISBN 80-05-00526-1.

18. JURSA, David. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro gravírování* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: http://stretech.fs.cvut.cz/2019/sbornik_2019/sbornik2019/124.pdf
19. MAJUMDAR, Jyotsna Dutta a Indranil MANNA. *Laser-Assisted Fabrication of Materials*. 161. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. ISBN 3642283586.
20. *Hlavní typy laserů v průmyslové praxi* [online]. 04. 09. 2012 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi
21. *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem* [online]. 17. 07. 2006 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem
22. *Laser basics. LASERLINE® Technical.* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.boconline.co.uk/en/images/laser-basics_tcm410-39552.pdf
23. *Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser?* [online]. 14. 03. 2007 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser
24. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
25. *Co rozhoduje při volbě typu laseru* [online]. 07. 09. 2011 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru
26. BENKO, Bernard. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
27. MARINOV, Valery. *Direct-write technologies for rapid prototyping applications: sensors, electronics, and integrated power sources* by A. Piqué and D. B. Chrisey (eds.), Academic Press, New York, 2002, ISBN 0-12-174231-8, 726pp. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* [online]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2005, **19**(9), 741-743 [cit. 2022-05-20]. ISSN 0890-6327. Dostupné z: doi:10.1002/acs.870
28. *Značení a gravírování laserem* [online]. 21. 05. 2003 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/znaceni-a-gravirovani-laserem
29. *Plastic Marking With a Fiber Laser* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.spilasers.com/Applications/redENERGY%20/Plastics_Marking_With_A_Fiber_Laser.aspx
30. STEEN, William M. *Laser Material Processing*. 2 ed. London: Springer, 1998, 346 s. ISBN 3-540-76174-8.
31. *Innoslab lasers* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: http://www.photonicnet.de/veranstaltungen/angebote-photonicnet/events-2007%20/workshop-photovoltaics/abstracts/resolveUid/bb394aa49c3928262b21dd9a36c1beb5/
32. CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Inovace v oboru laserových technologií a jejich aplikací* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Chmelickova-Inovace_laserovych_technologii.pdf

33. *Popisovací lasery* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.medicom.cz/prumyslove-lasery-katalog/produkty/popisovaci-lasery/

34. KOÇ, Muammer, Muammer KOÇ a Tugrul ÖZEL. *Micro-manufacturing*. Hoboken: WILEY, 2011. ISBN 1118010558. Dostupné z: doi:10.1002/9781118010570

35. *Laser 2007* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/laser-2007_13170.html

36. BUCHFINK, Gabriela. Ed. Nicola, LEIBINGER-KAMMÜLLER. Transl. Matthew R. The laser as a tool a light beam conquers industrial production. 1. ed. Würzburg: Vogel, 2007. ISBN 978-383-4330-727.

37. NOWOTNY, Steffen, Siegfried SCHAREK, Eckhard BEYER a Karl-hermann RICHTER. Laser beam build-up welding: Precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition. *Journal of thermal spray technology* [online]. MATERIALS PARK: ASM INT, 2007, **16**(3), 344-348 [cit. 2022-05-20]. ISSN 1059-9630. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-007-9028-5

38. *Fiber laser* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/en_SG/products/laser/fiber-laser/

39. *Laser Micromachining* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.potomac-laser.com/services/laser-micromachining/

40. *Laserem popisovatelné plasty* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/vyber-plastovych-materialu/znaceni-laserem

41. *Značení a gravírování kovů* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.megaflex.cz/lasery/material/znaceni-a-gravirovani-kovu/

42. *Gravírování skla a křišťálu* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.megaflex.cz/lasery/material/gravirovani-skla-a-kristalu/

43. *Řezání a gravírování dřeva* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.megaflex.cz/lasery/material/rezani-a-gravirovani-dreva/

44. *Measuring Laser Power and Energy Output* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://june.uoregon.edu/experiments/modelocked-fiberlaser/aboutmeasuringlaserpowerndenergyoutputfinal.pdf

45. *Rytí diamantem* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.intersign.cz/gravirovani-ryti-diamantem

46. *Tisk do kovu* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: http://www.lpts.cz/signmaking/tisk-do-kovu

47. *Pantograph* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.peter.com.au/articles/pantograph.html

48. *Frézování - gravírování - rytí* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: http://www.adhesia.cz/stroje/frezovani.htm

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
BPP	beam parametr product	[mm·rad]
E	energie pulsu	[W]
E_0	minimální energie	[W]
E_x	dodaná energie	[W]
M^2	parametr charakterizující laserový paprsek	[-]
P_{AVG}	průměrný výkon	[W]
P_{PEAK}	špičkový výkon	[W]
S	poloha ohniska	[$W \cdot cm^{-2}$]
f	frekvence	[Hz]
h	Planckova konstanta	[J·s]
h_f	elektromagnetické záření	[J·s]
n	počet prvků statistického souboru	[-]
t	časová délka pulsu	[s]
x_i	prvek statistického souboru o indexu i	[mm]
z	teoretická hloubka kráteru	[µm]
Θ	úhel rozbíhavosti paprsku	[rad]
δ	hloubka penetrace zařízení	[µm]
Φ	hustota špičkové energie	[$J \cdot cm^{-2}$]
Φ_{th}	hraniční hustota energie	[$J \cdot cm^{-2}$]
λ	vlnová délka	[-]
π	Ludolfovo číslo	[-]
σ	směrodatná odchylka	[-]
σ^2	rozptyl	[-]
ω	průměr ohniska	[mm]

Zkratky

Označení	Legenda
BPP	beam parametr product
IR	infra red
TEM	transverse elektromagnetic mode
UV	ultra violet