

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV
STROJÍRENSKÉ
TECHNOLOGIE

APLIKACE LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ V PRŮMYSLU SE ZAMĚŘENÍM NA OBRÁBĚNÍ A ÚPRAVU POVRCHU.

INDUSTRIAL APPLICATION OF LASER TECHNOLOGY FOCUSING
ON MACHINING AND SURFACING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR MERENDA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN SLANÝ

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Merenda

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

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

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

Aplikace Laserových technologií v průmyslu se zaměřením na obrábění a úpravu povrchu.

v anglickém jazyce:

Industrial Application of Laser Technology Focusing on Machining and Surfacing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Popis a rozbor současného stavu Laserových technologií
2. Aplikace Laseru ve strojírenském průmyslu
3. Rozbor procesu obrábění a hloubkové gravírování za využití technologie LBM
4. Experimentální část
5. Technicko-ekonomické zhodnocení
6. Závěr

Cíle diplomové práce:

Rozbor a zhodnocení technologií LBM se zaměřením na proces obrábění a hloubkového gravírování v průmyslu.

Seznam odborné literatury:

ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonenční metody obrábění 4. díl : Laser LBM [online]. 2008-03-20 [cit. 2009-09-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-4-dil>>.

HUMÁR, A. Technologie I: : Technologie obrábění - 3. část. [online]. [cit. 2009-05-02]. 57 s. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>

KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

MAŇKOVÁ, I. Progresivní technologie, 1 vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

OBERG, E., JONES, F.D., HORTON, H.L., RYFFEL, H.H. Machinery's hand-book. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. 2547 s. ISBN 0-8311-2595-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Slaný

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 19.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zaměřuje na začlenění laserových technologií mezi ostatní způsoby obrábění, zejména v oblasti značení. Přibližuje problematiku laserového gravírování maticových kódů (data matrix kódů) v automobilovém průmyslu. Největší prostor je věnován YAG a CO₂ laserům. Experimentální část této práce se zabývá určením výsledků laserového gravírování aplikované v procesu tampónového tisku.

Klíčová slova

laser, gravírování, značení, maticové kódování

ABSTRACT

The topic focuses on implementation of the laser technologies onto machining operations, especially in the field of marking. In general, the work deals with problems of laser engraving of data matrix codes in car production. A special attention is devoted to the YAG and CO₂ lasers. Experimental part of the work deals with results of laser engraving applied in the process of tampon printing.

Key words

laser, engraving, marking, data matrix code

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MERENDA, Petr. *Název: Aplikace Laserových technologií v průmyslu se zaměřením na obrábění a úpravu povrchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. s. 74, příloh 4. Ing. Martin Slaný.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Aplikace Laserových technologií v průmyslu se zaměřením na obrábění a úpravu povrchu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. 05. 2010

.....
Petr Merenda

Poděkování

Děkuji tímto panu Petru Fraňkovi ze společnosti REDA a.s., vedení a pracovníkům firmy Continental Automotive Systems Czech Republic s.r.o. a Ing. Martinu Slanému za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	9
1 Popis a rozbor Laserových technologií	11
1.1 Historie	11
1.2 Definice laseru	12
1.2.1 <i>Princip laseru</i>	12
1.3 Klasifikace laserů.....	15
1.3.1 <i>Plynové</i>	15
1.3.2 <i>Kapalinové</i>	16
1.3.3 <i>Pevnolátkové</i>	16
1.3.4 <i>Polovodičové</i>	17
1.3.5 <i>Lasery pracující na principu kovových par</i>	17
1.3.6 <i>Některé nové druhy laserů</i>	18
1.4 Použití laserů	19
2 APLIKACE LASERU VE STROJÍRENSKÉM PRŮMYSLU	20
2.1 Řezání laserem.....	20
2.2 Svařování laserem	22
2.3 Vrtání laserem.....	24
2.4 Značení laserem.....	25
2.4.1 <i>Vznik popisu na povrchu materiálu</i>	26
2.4.2 <i>Některé příklady použití laserového značení</i>	27
2.5 Gravírování laserem	28
2.6 Tepelné zpracování.....	29
3 ROZBOR PROCESU OBRÁBĚNÍ A GRAVÍROVÁNÍ ZA VYUŽITÍ	
TECHNOLOGIE LBM	31
3.1 Charakteristika LBM.....	31
3.1.1 <i>Režimy paprsků</i>	32
3.2 Kategorizace laserů podle procesů opracování materiálů.....	32
3.3 Gravírování strojově čitelných kódů	32
3.3.1 <i>Co jsou strojově čitelné kódy</i>	33
3.3.2 <i>Porovnání 2D data matrix a čárových kódů</i>	34
3.3.3 <i>Laserové značení 2D data matrix kódů</i>	35
3.3.4 <i>Aplikace 2D data matrix kódů</i>	37
3.4 Použití značících laserů v automobilovém průmyslu.....	38
3.4.1 <i>CO₂ laser</i>	38
3.4.2 <i>YAG laser</i>	39
4 VLASTNÍ EXPERIMENT.....	41
4.1 Materiály a zařízení	41
4.2 Podmínky pro experiment.....	42
4.3 Vytváření projektů	43
4.3.1 <i>Pravidla pro nastavení programu</i>	43
4.3.2 <i>Popis funkce ovladačů</i>	44
4.3.3 <i>Ovládání provozu laseru</i>	48

4.3.4 Spuštění projektu	49
4.4 Sledované veličiny a použitá měřidla.....	49
4.5 Aplikace laseru v reklamním průmyslu	51
4.6 Proces tampónového tisku	51
4.7 Průběh experimentu	53
4.8 Výsledky a rozprava	54
5 Technicko-ekonomické zhodnocení	65
5.1 Reklamní průmysl	65
5.1.1 Zhodnocení laserového gravírování klišé	65
5.2 Porovnání technologií laserového popisování a termotransferového tisku etiket z hlediska výrobních nákladů v automobilovém průmyslu.....	67
ZÁVĚR	69
Seznam použitých zdrojů	70
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	72
Seznam příloh	74

ÚVOD

Tento rok je to přesně 50 let od doby, kdy byl zkonstruován první laser. Je až neuvěřitelné, kde všude se s ním a jeho mnohostranným využitím můžeme setkat. Počínaje laserovým ukazovátkem, přes měřicí aplikace, ve výpočetní technice u optických záznamových médií (CD, DVD), geodezii, automatizaci, v estetické i všeobecné medicíně, až po sofistikované stroje pro dělení materiálů a nekonvenční technologie v obrábění.

U obrábění, opracování materiálů a úpravě povrchů, pracuje laser na principu přeměny světelné energie na energii tepelnou. Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem, možnost opracování obtížně přístupných částí materiálů a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů¹.

Díky koherenci a monochromatickosti laserového paprsku, lze laserovým paprskem soustředit velké množství energie na malou plochu. Toho se v průmyslu využívá pro řezání, dělení a vrtání materiálů. Další široce uplatněnou oblastí se stávají datové přenosy prostřednictvím optických vláken².

V současné době je laserové značení a gravírování hojně používáno v automobilovém a reklamním průmyslu. Tento fakt mě ovlivnil natolik, že jsem se touto technologií rozhodl zabývat ve své diplomové práci.

Cílem této práce je rozbor a zhodnocení technologií, u nichž se používá laserového paprsku jako nástroje, se zaměřením na proces obrábění a hloubkového gravírování v průmyslu.

V minulosti byly lasery široce využívány k řezacím a svařovacím operacím. Ale v posledních letech díky variabilitě laserových zdrojů, charakterizovaných změnou délky pulsu z nanosekund na femtosekundy, mohly být aplikovány i v jiných průmyslových odvětvích jako značení, rýhování a gravírování. Mezi výhody těchto procesů patří bezkontaktnost nástroje s obrobkem, velká opakovatelnost, vysoká rychlost, flexibilita a automatizace. Gravírovací operace se do jisté míry podobá čelnímu frézování, s tím rozdílem,

že se používá nástroj s daleko menším průměrem (laser), oproti klasickým frézám. Vypálením povrchové vrstvy laserem dostaneme takovou plochu, kterou není třeba dále opracovávat. Abychom dosáhli požadované kvality gravírovaného povrchu, je třeba brát zřetel na teplotní pole a dobu působení laseru, což souvisí s výkonem laseru a charakteristikou paprsku. Dále ještě umožňuje nastavení rychlosti odstraňování materiálu a lze také u málovýkonných laserů dosáhnout mělkých a přibližně stejně hlubokých reliéfů. To předurčuje tuto technologii k širokému využití v průmyslové výrobě zejména ke značení a gravírování výrobků. Než se dostaneme k samotnému opracování, je důležité vybrat optimální parametry procesu jako např. vlnová délka, průměr paprsku, frekvence opakování pulzů, rychlost skenování a výkon laseru podle absorpce materiálu a požadované kvality povrchu²⁵.

Cílem experimentu je zjistit vhodné nastavení vláknového laseru v gravírovací operaci zahrnující gravírování reliéfů do klišé, na které se následně nanáší a stírá barva. Hodnotí se míra odebraného materiálu a kvalita povrchů gravírovaných ocelových klišé.

1 POPIS A ROZBOR LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ

1.1 Historie

Základní teoretický popis laserového paprsku vynuceného emisí záření začíná již v roce 1917 a to díky Albertu Einsteinovi. Ale až začátkem 50. let byly položeny základy nového oboru, jenž se jmenuje kvantová elektronika, kde byly sestrojeny zařízení generující a zesilující elektromagnetické záření na principu stimulované emise záření¹.

První návrh laseru projektovali C. H. Towns a A. L. Shawlow roku 1958. O dva roky později, tedy roku 1960 zkonstruoval T. H. Maiman první funkční rubínový laser².

Dále byly realizovány další laserové zařízení na základě pevných, plyných a kapalných aktivních látek. Ve vývojovém středisku v USA roku 1961 Javan, Bennet a Heriot odzkoušeli plynový hélium-neónový (He-Ne) laser. Téhož roku byl Snitzerem poprvé použit pevnolátkový laser na bázi neodým (Nd)-sklo. Polovodičový laser byl objeven roku 1962. Argónový iónový laser a pevnolátkový neodým (Nd-YAG) laser byly poprvé představeny roku 1964. Téhož roku C. H. Patel experimentoval s plynovým CO₂ laserem, který má v současné době nejširší uplatnění v průmyslové výrobě¹.

Vůbec první praktické průmyslové užití laseru uvádí Epperson v roce 1966. Pro vrtání otvorů do diamantových kalibrů využil laserovou technologii, kde pro iniciaci paprsku použil rubín³.

V 70. letech minulého století byl představen systém zpracování materiálu, který otevřel širokou škálu technologických výhod nejen pro existující aplikace, ale také pro aplikace zcela nové. Laserové technologie od té doby podstoupily řadu významných vývojových zlepšení, které neustále pokračují zejména díky rozvoji výpočetních technologií⁴.

1.2 Definice laseru

LASER- z anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation znamená zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Definice říká, že laser je kvantový generátor a zesilovač koherentního (vnitřně uspořádaného, sfázovaného optického záření), které vyniká extrémní monochromaticností (všechny fotony mají stejnou vlnovou délku a frekvenci), nízkou divergencí svazku (všechny fotony laserového záření se pohybují stejným směrem), vysokou hustotou přenášeného výkonu či energie. Tyto vlastnosti neposkytuje žádné jiné záření, kromě záření generované laserem. Vlnové délky laserového záření spadají od mikrovlnné oblasti, přes infračervené tepelné záření a viditelné světlo až po rentgenové paprsky⁵.

1.2.1 Princip laseru

Existuje mnoho různých typů laserových generátorů, avšak každý generátor obsahuje tři prioritní části: laserové aktivní prostředí, v němž se uskutečňuje zesilování záření, zdroj čerpání pro excitaci (nabuzení) aktivního prostředí a rezonátor vytvářející zpětnou vazbu mezi aktivním prostředím a zářením, které vede ke vzniku laserových oscilací. Základní význam pro funkci laseru má proces stimulované emise, který může nastat při interakci excitovaného kvantového systému (atomu, iontu nebo molekuly) s elektromagnetickým zářením-fotonem, jehož frekvence ν odpovídá energetickému rozdílu $E_2 - E_1$ mezi excitovaným a některým níže položeným stavem kvantového systému. Přitom dochází k přechodu kvantového systému do tohoto energeticky chudšího stavu a současně je excitační energie uvolněna emitováním fotonu s energií⁵.

Energie uvolněného fotonu⁵:

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1, \quad (1.1)$$

(h je Planckova konstanta). Podstatné je, že i ostatní vlastnosti emitovaného fotonu jsou stejné jako u fotonu, který emisi stimuloval. Tohle je podstatou zesilování světla.

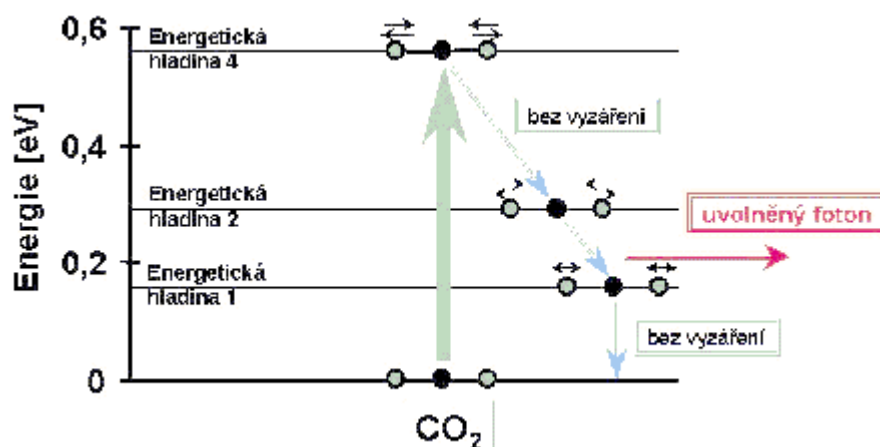
Obečný princip laseru dle Šulce je následující: zdroj budící energie zajišťuje, aby se v aktivním prostředí nacházelo dostatečné množství kvantových soustav v excitovaném stavu. Poté, co některá kvantová soustava aktivního prostředí přejde náhodně spontánní emisí do nižší hladiny, bude uvolněné kvantum stimulovat i další kvantové soustavy k přechodu na spodní energetickou hladinu a emisi fotonů. Část fotonů se může kvantovými soustavami opět absorbovat. Pokud však bude v aktivním prostředí více kvantových soustav v excitovaném stavu (inverze populace hladin) bude se optické záření zesilovat řetězovou reakcí. Spontánní emise se stane zanedbatelnou vzhledem k emisi stimulované a generované záření nabude jednotné povahy, tj. bude koherentní a monochromatické. Aktivní prostředí se formuje do tvaru dlouhého válce, aby se zajistila směrovost laserového záření. Aktivní prostředí je umístěno uvnitř optického rezonátoru. Ten zajišťuje selektivní kladnou zpětnou vazbu systému – jen rezonující fotony se budou zesilovat. Její velikost lze nastavit tak, aby byla maximální pro laserový paprsek požadovaných vlastností. Po dostatečném zesílení je laserový svazek z rezonátoru vyveden skrz polopropustné zrcadlo⁵.



Obr. 1.1 Aktivní prostředí v rezonátoru.

Oxid uhličitý tvoří laserové médium v CO_2 laserech. Oxid uhličitý se dostává do excitovaného stavu přívodem vnější energie a to buď elektrickým výbojem, nebo vysokofrekvenčním výbojem. Při uvolnění energie excitované molekuly oxidu uhličitého se vygeneruje světelná částice – foton.

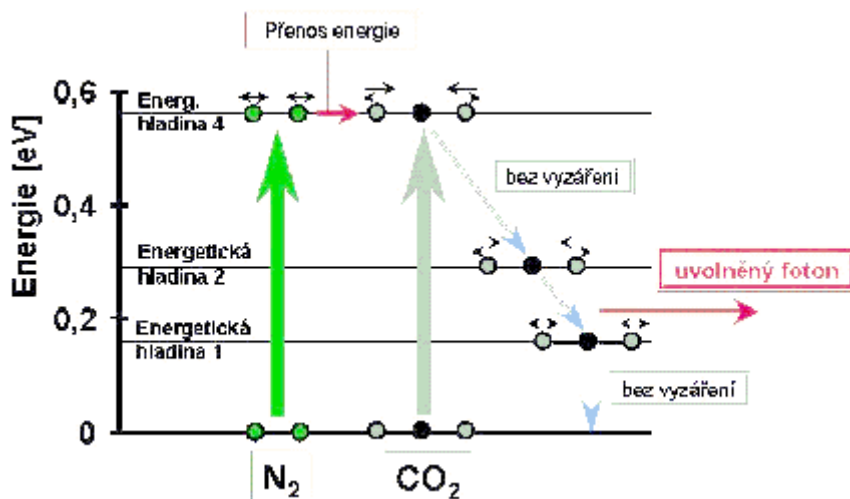
Molekula oxidu uhličitého musí projít třemi energetickými hladinami, aby se dostala na hladinu 4 tj. hladinu excitovaného stavu, ze které je možné uvolněním energie na hladinu 1 vygenerovat foton. U samotného CO_2 , jako média, je velmi málo molekul, které se dostanou na hladinu excitovaného stavu. Ostatní molekuly, při dosažení nejbližší vyšší energetické hladiny tuto hladinu okamžitě opouštějí bez vyzáření světelné částice⁶.



Obr. 1.2 Uvolnění energie excitované molekuly samotného CO_2 ⁶.

K tomu, aby se zvýšilo množství nabuzených molekul oxidu uhličitého během dodávky vnější energie, jsou zapotřebí i ostatní plyny tvořící směs laserového média, jako dusík a helium. Molekulu dvouatomového dusíku je také možné dostat do excitovaného stavu přívodem vnější energie. První energetická hladina dusíku je na téměř stejné úrovni jako čtvrtá hladina u oxidu uhličitého, čehož se využívá k přenosu energie z excitované molekuly dusíku na molekuly oxidu uhličitého vzájemnými kolizemi a tím dosáhneme vyššího počtu excitovaných molekul oxidu uhličitého.

Helium napomáhá molekule oxidu uhličitého k relaxaci (uvolnění) energie z první energetické hladiny do klidového stavu odebráním tepelné energie tak, aby bylo možné opakovaně excitovat molekuly oxidu uhličitého⁶.



Obr. 1.3 Přenos energie z excitované molekuly N_2 na CO_2 kolizemi⁶.

1.3 Klasifikace laserů

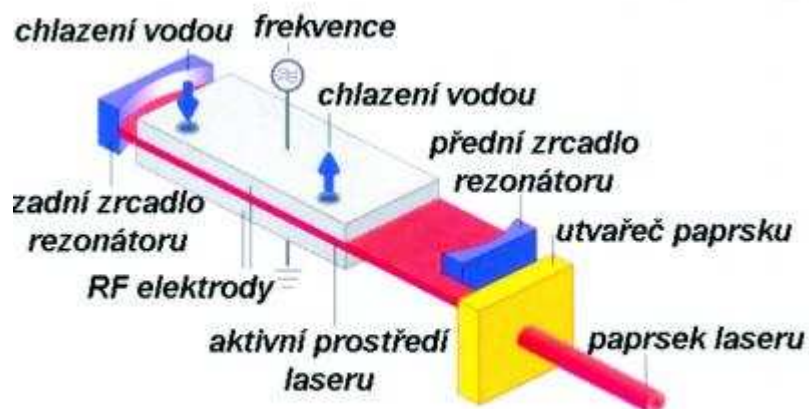
Lasery můžeme rozdělit dle několika hledisek, např.:

- podle skupenství aktivní látky (laserového média)
- vlnové délky záření
- režimu paprsku
- výkonu
- konstrukce zařízení
- použití

Podle aktivního prostředí je lze rozdělit na⁷:

1.3.1 Plynové

Většina plynových laserů pracuje v kontinuálním režimu. Byly ovšem vyvinuty i lasery s mimořádně vysokým výkonem pracující v režimu pulzním. Plynové lasery je možné budit elektrickým výbojem, chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku rychlých elektronů nebo opticky⁸.



Obr. 1.4 Schéma CO₂ laseru⁹.

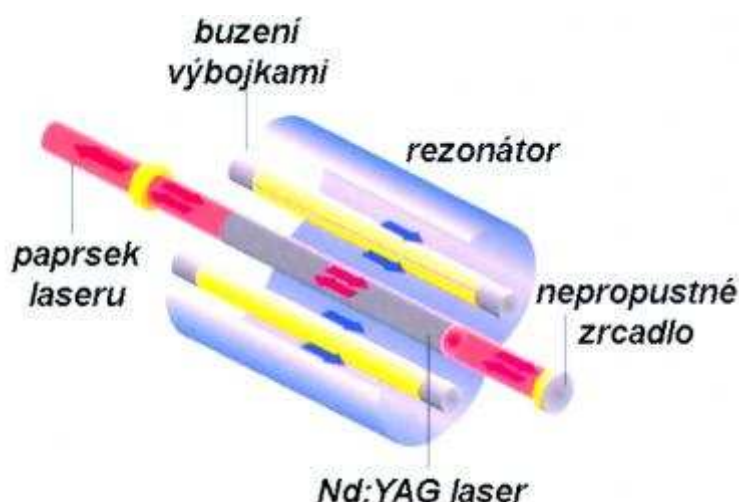
1.3.2 Kapalinové

Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny, dopované ionty vzácných zemin. Pro buzení kapalinových laserů se užívá optické záření⁸.

Použití kapalinových laserů je především ve spektroskopii. Novou aplikací je využití možnosti naladění přesné vlnové délky v medicíně – ve fotodynamické terapii, kdy se působením záření přesné vlnové délky ničí rakovinotvorný nádor předem „napuštěný“ speciálním organickým barvivem (barvivo se působením záření rozpadá a volný generovaný kyslík ničí rakovinotvorné buňky)⁸.

1.3.3 Pevnolátkové

Aktivním prostředím je dielektrikum, tj. pevná, opticky propustná látka. Základním materiálem, který určuje většinu technických vlastností daného krystalu, je u pevnolátkových laserů matrice, která musí být průzračná, opticky homogenní a musí být technologicky možné ji uměle vyrábět⁸.



Obr. 1.5 Schéma Nd:YAG laseru⁹.

1.3.4 Polovodičové

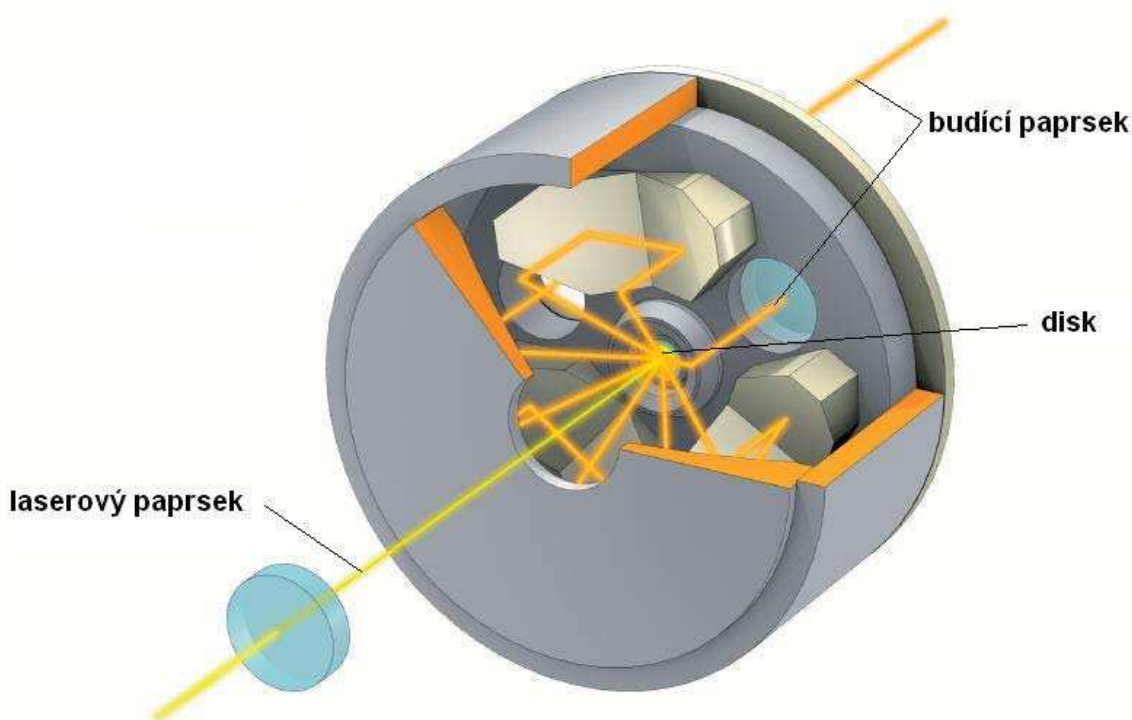
Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány. Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost, velká účinnost (až 50 %), možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a pomocí výběru aktivního prostředí generace záření vlnových délek od $\lambda = 0,3$ do $30,0 \mu\text{m}$. Nevýhodou je rozbíhavost generovaného záření a velká závislost parametrů generovaného záření na teplotě aktivního polovodičového materiálu. Polovodičové lasery se používají především pro popisování součástí, řezání, tepelné svařování a v technologiích Rapid Prototyping⁸.

1.3.5 Lasery pracující na principu kovových par

V průmyslu se používají také lasery pracující na principu kovových par vzácných prvků. Jde např. o lasery pracující na principu Cu par. Produkují záření o výstupním výkonu 120 W, o vlnové délce 510,6 a 578,2 nm, frekvence pulzů je 30 kHz, délka pulzu 20 až 50 ns, špičkový výkon v pulzu nad 100 kW. Typické aplikace použití laserů pracujících na principu kovových par jsou: vrtání děr o průměru 50 až 200 μm , řezání fólií, křemíkových desek a vytváření hustých mřížek. Drsnost stěn vyvrtané díry je 1 až 2 μm , rychlost vrtání velká a tepelné ovlivnění okolního materiálu díry malé⁹.

1.3.6 Některé nové druhy laserů

Prudký rozvoj zaznamenávají diodami čerpané pevnolátkové lasery. Jsou to především Nd:YAG lasery, u nichž jsou pro čerpání energie z krystalu dosud používané výbojky nahrazeny laserovými diodami, případně diodovými lasery. Výhodami těchto laserů jsou vyšší účinnost, menší spotřeba elektrické energie, menší celkové rozměry, delší trvanlivost diod oproti výbojkám (životnost diod je cca 10 000 hod.) a menší provozní náklady. Dalším vývojovým stupněm diodami čerpaných pevnolátkových laserů jsou kotoučové lasery (obr. 1.6)⁹.



Obr. 1.6 Princip kotoučového laseru¹².

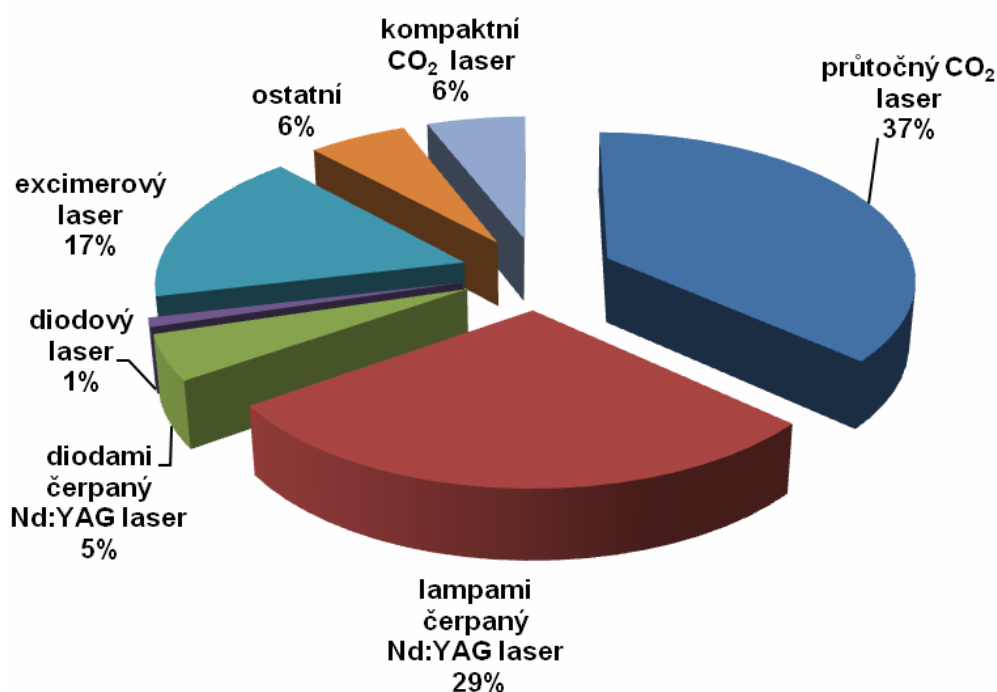
U tohoto typu laseru je krystal, dosud používaný ve tvaru válce nebo desky, nahrazen kotoučem o tloušťce 0,3 mm a průměru 7,0 mm. Kotouč lze vyrobit z krystalu Yb:YAG, čímž se oproti krystalu z Nd:YAG zvýší účinnost čerpání ze 76 % na 91 %. Výkony kotoučových laserů se v současné době pohybují do 350 W⁹.

Kotoučové lasery mohou dobře zaostřit paprsek, pracují v kontinuálním i pulzním režimu s délkou pulzu v rozsahu femtosekund. Konstrukce laseru

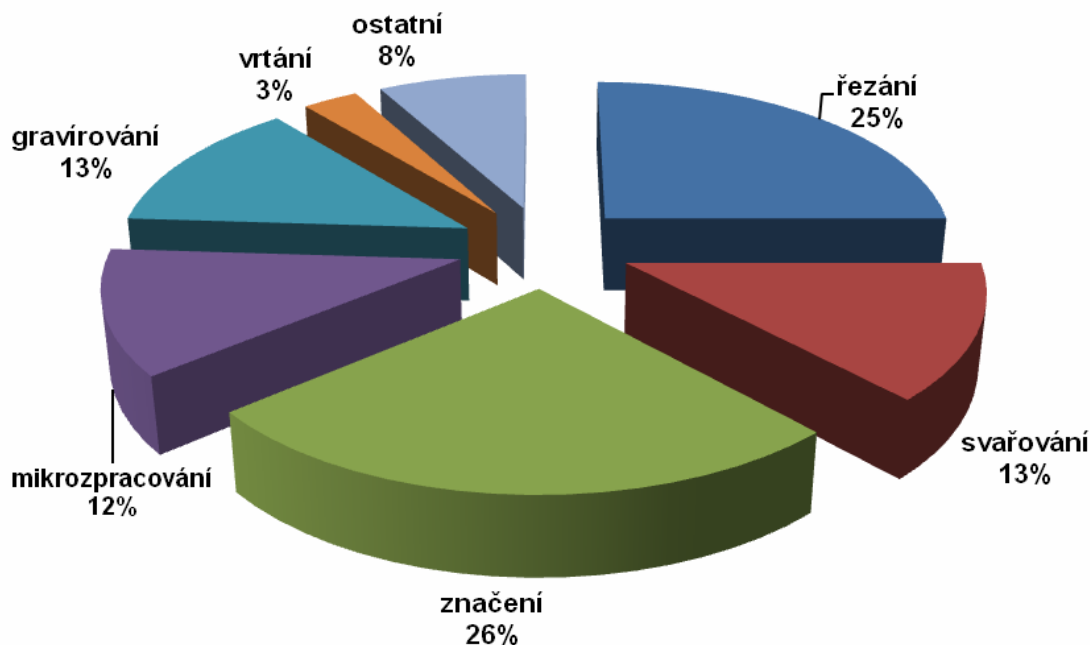
je kompaktní. V poslední době se začínají v technologii používat vláknové lasery s výstupním výkonem 2 až 30 W a vlnovou délkou záření 1,06 nm. Používají se pro značení, popisování, vrtání mikrootvorů, mikrořezání a svařování⁹.

1.4 Použití laserů

Největší prostor na trhu v laserových aplikacích všeobecně zaujímají CO₂ lasery. To je způsobeno vysokým procentuálním využitím CO₂, jako aktivního prostředí u značících a gravírovacích zařízení, jak je patrné z (obr. 1.8). Další důvody, proč jsou tyto lasery v takovém rozsahu používány, je jejich vlnová délka, jednoduchá obsluha a snadná údržba.



Obr. 1.7 Rozdělení podílu na trhu u jednotlivých typů laserů⁸.



Obr. 1.8 Grafické rozdělení využití jednotlivých technologií⁸.

2 APLIKACE LASERU VE STROJÍRENSKÉM PRŮMYSLU

Rostoucí požadavky na zvyšování kvality a efektivity ve výrobě, mělo za následek nasazení laserů do procesu výroby, které konvenční nástroje překonají ve všech důležitých aspektech, jako např.: rychlosti, výkonnosti, přesnosti a flexibilitě. Mezi další nesporné výhody pro začlenění laseru do průmyslové výroby patří jednoduchost obsluhy a údržbová nenáročnost. V dnešní době se lasery uplatňují ve všech stádiích výroby. Používají se k řezání, svařování, vrtání, značení, gravírování, kalení¹⁰.

2.1 Řezání laserem

Řezání materiálu patří spolu s gravírováním mezi nejčastější aplikace v průmyslové výrobě. K řezání je zapotřebí vysoko výkonové lasery, jejichž výkonové hodnoty jsou udávány v kW. Snahou tohoto procesu je odpaření materiálu tak, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění okolní oblasti. S tím souvisí i dobrá kvalita řezné hrany⁴.

Dále můžeme říci, že není potřeba dalších úprav a odpadají tak ruční dokončovací operace jako zabrušování hran a odstranění otřepů. Výhodou také je, že laserem mohou být řezány všechny materiály, až na některé výjimky (Al, Cu), kde je zapotřebí užít správného laseru. Pro tyto výhody je laserová technologie řezání s častými obměnami výroby velice oblíbená u výrobců prototypových dílů, dodavatelů pro automobilový průmysl a zpracovatelů tenkých plechů⁴.

Laserový paprsek vycházející z rezonátoru je pomocí speciální čočky zaostřen na povrch materiálu, který se natavuje a řezacím plynem přiváděným koaxiální dýzou se tavenina vyfukuje. Jako řezný plyn se pro řezání kovů používá kyslík nebo dusík. K řezání nekovových materiálů se využívá tzv. sublimačního řezání, kdy se materiál přímo odpařuje zaostřeným laserovým paprskem⁴.

V závislosti na druhu materiálu a požadované kvalitě řezu volíme reaktivní řezací plyn kyslík nebo dusík. Kyslík je spolu s paprskem přiveden do místa řezu, kde chemicky reaguje s řezaným materiálem (exotermická reakce) a zajišťuje tak vyšší řezné rychlosti ve srovnání s dusíkem. Přednostně se používá kyslíku pro řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, kde čistota kyslíku prokazatelně ovlivňuje maximální řeznou rychlost⁴.

Při řezání nekovových materiálů jako jsou keramika, sklo, plasty, dřevo, textilie apod. je k místu řezu přiveden proud inertního plynu, který slouží pouze k odstranění odpařeného nebo odtaveného materiálu (do tl. 25 mm)¹³.

U řezání vysokolegovaných ocelí kyslík způsobuje vznik těžko odstranitelné strusky v oblasti řezných hran. Řezání slitin hliníku kyslíkem je o cca 25 – 30 % rychlejší než řezání dusíkem, naproti tomu ovšem stojí snižená kvalita řezu, ztráta korozní odolnosti materiálu a vysoká drsnost povrchu. Proto pro řezání vysokolegovaných ocelí a slitin hliníku používáme dusík. Oproti kyslíku je snižená rychlost řezání a maximální řezatelná tloušťka, což lze kompenzovat tlakem asistenčního plynu. Řezné hrany jsou čisté, bez oxidů a strusky, nízkou drsností povrchu. U dusíku použitého jako asistenčního plynu jsou kladeny vysoké požadavky na jeho čistotu, v největší

míře na podíl zbytkového kyslíku a vlhkosti plynu. Dokonce i nepatrné množství kyslíku a vzdušné vlhkosti způsobuje vypálení legujících prvků (Cr), což znamená ztrátu korozní odolnosti v oblasti řezné hrany¹³.

Další skupina materiálů spadajících mezi velmi reaktivní kovy jako je titan nebo zirkonium musí být chráněna před účinky kyslíku a dusíku, popř. vzduchu. Tyto materiály se řezou za asistence vysoce čistého argonu⁴.

Metody řezání lze rozdělit na řezání odpařením, odtavením, reaktivním odtavením, kontrolovaným lomem, rýhováním, studené řezání a stabilizované pálení. Stále obvyklejší formou řezání laserem je mikrořezání¹³.



Obr. 2.1 Proces řezání profilů¹⁸.

2.2 Svařování laserem

Vhodnost použití laserového svařování je u automatizovaných procesů a to z hlediska kvalitativního i kvantitativního. Tato technologie umožňuje svařování bez použití přídavného materiálu. Laser poskytuje paprsek o vysokém energetickém výkonu na malém průměru (0,5 mm). Proto lze svařovat materiály s vysokou teplotou tání i materiály s odrazivým povrchem. Rychlost ohřevu materiálu v místě fokusace je daleko vyšší než odvod tepla

do okolního prostředí z čehož vyplývají výhody jako štíhlost svaru a malé teplotní ovlivnění okolní oblasti¹⁴.

Používají se jak CO₂ lasery, tak i Nd:YAG lasery, které jsou do průmyslové výroby stále více implementovány. Vysokovýkonné lasery s CO₂ (2-12 kW) se v automobilovém průmyslu používají ke svařování karosérií nebo komponent převodovek. V procesním inženýrství pro svařování tepelných výměníků⁴.

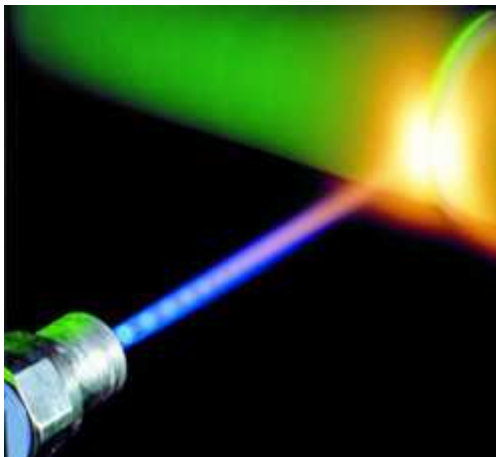
Nd:YAG lasery o nízkém výkonu (100-500 W) se používají ke svařování malých dílů, např. u lékařských přístrojů a elektronických agregátů. Lasery Nd:YAG o vysokém výkonu (v rozsahu kW) se často dodávají společně s roboty a vláknovou optikou⁴.

Paprsek je fokusován na malý rozměr a jeho intenzita taví a odpařuje materiál. Pro zaostření vysoké energie laseru s CO₂ jsou předně používána zrcadla chlazená vodou místo čoček. Svařování se v podstatě provádí dvěma technologiemi. Svařování kondukcí – u této metody je teplo přenášeno na povrch materiálu vedením. Tento způsob svařování je typický pro laser Nd:YAG o nízkém výkonu, dochází zde k vytvoření svaru o hloubce řádově v desetinách mm⁴.

Key hole svařování neboli hluboké svařování – znamená v překladu svařování “klíčovou dírkou”, za použití vysokovýkonného laseru. Laserová energie taví a v krátkém časovém horizontu vypařuje kov z místa svaru. Tlak par přemísťuje roztavený kov tak, že se vytvoří dutina – “klíčová dírka”. “Klíčová dírka” podporuje přenos laserové energie do kovu a zavádí laserový paprsek hluboko do materiálu. Aplikací této metody můžeme dosáhnout velmi hlubokých a úzkých svarů⁴.

Plyny používané ke svařování laserem musí splňovat celou řadu kritérií: chránit svarový kov a plochy ovlivněné teplem, zabezpečit ochranu optických částí proti působení par a rozstříku, chránit kořenové části svarů a kontrolovat plazma během svařování CO₂ laserem. Plazma je oblak par a plynů ionizovaného kovu, který se může vytvořit nad “klíčovou dírkou”. Tento oblak

ovlivňuje záření laseru a tím může přerušit proces svařování. Tento účinek závisí na typu laseru a na použité energii, proto se pro svařování laserem používají různé plyny, které toto nebezpečí mohou omezit⁴.



Obr. 2.2 Proces svařování trubek¹⁹.

2.3 Vrtání laserem

Vrtání laserem je založeno na odpařování kovu přičemž platí, čím delší díra, tím více se tvar díry liší od geometrie. To je způsobeno rozdělením energie paprsku. Používají se impulzní lasery s vysokou amplitudou výkonu, které odstraňují jednu vrstvu materiálu za druhou až do vytvoření díry. Velkou výhodou laserového vrtání je vytváření velmi malých otvorů o průměru 10 μm až 100 μm i v místech, kde je to pomocí jiných metod obtížné nebo nemožné. Díry mohou být kruhové i tvarové. Délka vrtaného otvoru může být až 50 mm. Vrtat lze různé druhy materiálů např.: kovy, plasty, textilie, dřevo, sklo, papír, keramiku a jiné přírodní materiály. Tato technologie se používá pro vrtání kamenů do hodinek, filtrů, vstřikovacích trysek, lopatek proudových motorů apod⁹.

Pro vrtání se používají:

- CO₂ lasery - vyřezávání otvorů (kruhových i tvarových), kde nejmenší průměr vyřezávaného otvoru je 5 mm a nejmenší průměr vrtané díry 0,2 mm,
- Nd:YAG lasery - vrtání děr o menším průměru, nejmenší průměr vrtané díry je 0,025 mm,
- excimerové lasery - vrtání děr do keramiky.

V průmyslových odvětvích se pro vrtání děr upřednostňují především Nd:YAG lasery o výstupním výkonu 100 až 500 W⁹.



Obr. 2.3 Vrtání kalených ocelí²⁰.

2.4 Značení laserem

Můžeme říct, že se jedná o relativně novou technologii, která si ovšem velice rychle našla své místo na trhu. Výhodou značení laserem je možnost aplikace na běžně používané materiály, ve většině případů bez nutnosti použití speciálních přísad. Laser na povrchu materiálu vytváří popis, který je stálý, mechanicky odolný, kontrastní a jinak nenapodobitelný a to všechno s vysokou přesností¹¹.

Popis vzniká v jednom kroku přímým působením laserového záření na povrch materiálu. Nevyžaduje se použití pigmentů či inkoustů oproti klasickým technologiím. Z těchto důvodů lze technologii laserového značení velmi jednoduše implementovat do výrobního procesu¹¹.

Velkého rozmachu v popisovacích technologiích laserového charakteru dosahují oproti dříve používaným Nd:YAG a CO₂ laserům lasery vláknové. "Fibre" neboli vláknové lasery jsou oproti dříve používaným Nd:YAG a CO₂ laserům výhodnější hned z několika důvodů:

- Mohou pracovat v kontinuálním i pulzním režimu.
- Dobu pulzu v pulzním režimu lze měnit v širokém rozsahu 1 - 200 ns.
- Frekvenci pulzů lze měnit také v širokém rozsahu od 1 do 500 kHz.
- Vysoký špičkový výkon v pulzu – desítky kW.
- Vysoká energetická účinnost až 25 %.
- Vláknem, ve kterém je emitováno laserové záření je chlazeno vzduchem.
- Výstupní svazek je velmi kvalitní (rozbíhavost řádově 1-2 mrad) a lze jej proto dobře zaostřit až na průměr 1 μm.
- Tyto lasery nevyžadují údržbu a udávaná životnost je 100 000 hod.
- Díky energetické nenáročnosti, bezúdržbového fungování a dlouhé životnosti přinášejí vláknové lasery i nejnižší provozní náklady¹¹.

2.4.1 Vznik popisu na povrchu materiálu

Překrytím jednotlivých pulzů laseru lze vytvořit linie, kterými je tvořen popis. Změnou rychlosti a frekvence se může překrytí jednotlivých pulzů měnit a dosáhnout tak různých linií. Jestliže se použije překrytí bodů menší než 5 %, bude vytvořen výsledný popis s nízkým rozlišením a okraje budou vroubkované. Pokud bude překrytí bodů větší než 65 %, pak bude výsledný popis vytvořen s vysokým rozlišením a okraje budou hladké.

Výsledný popis lze vytvářet s různým rozlišením dle požadavků na rychlost jeho tvorby a kvalitu popisu¹¹.

Popis může být vytvářen na rovinné, válcové i zakřivenné ploše. Lze také popisovat na povrch materiálu, který je: broušený, pískovaný, smaltovaný, lakovaný, černěný, opatřen povlakem chromu, zinku, titankarbidu, titannitridu, keramickým povlakem apod⁹.



Obr. 2.4 Popisování materiálů²¹.

2.4.2 Některé příklady použití laserového značení

- Kovy

Popis předmětů z oceli (řezné kotouče, pily, měřítka) – vhodným nastavením parametrů (rychlosti značení a frekvence pulzů) lze dosáhnout popisu ve stupních šedi i některých barevných odstínů.

- Plasty

Popis obalových materiálů (čárové kódy, trubky PVC, ABS) – laserový popis výborně splňuje požadavek na trvanlivost a mechanickou odolnost.

- Polovodiče

Využívá se při výrobě tenkovrstvých solárních článků – řezání křemíkových desek, rozdělení desky na pole článků, vrtání, tvorba vnitřních kontaktů, laserové pájení - systém přívodů k jednotlivým článkům, rozdělení panelu na jednotlivé články vytváření systému nevodivých cest. Tato technologie postupně vytlačuje klasické výrobní postupy používané při výrobě solárních článků. Její výhodou je především rychlost a přesnost. Zapojení této technologie do většiny operací výrobu podstatně zjednodušuje. Solární články, tak lze vyrobit s nižšími energetickými i ekonomickými náklady.

- Sklo

Sklo je obecně pro laserové technologie docela problematický materiál. A to kvůli jeho malé absorpci záření. Avšak tento problém lze vyřešit několika způsoby:

Značení pomocí napaření tenké kovové vrstvy na sklo – laserový svazek projde značeným sklem, na jehož druhé straně je přiložená kovová vrstva, ve které se absorbuje energie laserového záření.

Nebo pomocí navázání chemických směsí na povrch skla - tyto směsi obsahují pigmenty (oxidy kovů), dále látku absorbující na vlnové délce laseru a skleněná zrna. Směs je nanášena na značený povrch např. pomocí spreje, laserové záření je absorbováno ve složce směsi absorbující laserové záření, dojde k tavení částic skla a vytvoření vazeb mezi nimi a substrátem¹¹.

2.5 Gravírování laserem

Gravírování je proces podobný značení, s tím rozdílem, že při opakovaném úběru dosáhneme větších hloubek řádově v mm. Standardní hloubka gravírování se pohybuje mezi 0,0125 mm až 0,1500 mm. Umožňuje vytváření jednoduchých i velmi složitých a přesných reliéfů pomocí

odpařování materiálu v místě působení paprsku. Ke gravírování se využívají jak Nd:YAG, tak i CO₂ lasery. Nd:YAG lasery se používají pro gravírování kovových materiálů, plastů a keramiky. CO₂ lasery se používají pro organické materiály např.: dřevo, guma, papír, sklo⁹.

Ve strojním průmyslu se tato technologie uplatňuje především pro tvorbu reliéfů do forem z kalených ocelí určených ke vstřikování plastů. Dále k vytvoření popisů do zápustek, vygravírování datamatrix kódů do desek plošných spojů, značení nástrojů, popisu měřidel a v dalších procesech. Gravírování může být v rovině, v několika různých hloubkách nebo lze vytvářet prostorové reliéfy⁹.



Obr. 2.5 Hloubkové gravírování²².

2.6 Tepelné zpracování

Technologií tepelného zpracování za použití laseru dosáhneme přesné hloubky a požadované mikrostruktury. Charakteristiky procesu jsou minimální napětí a trhliny, kalení nevyžaduje chladicí médium, lze zpracovat celou součást nebo jen vybranou část¹⁵.

Laserové povrchové zpracování funguje na principu velmi rychlého ohřívání a chladnutí materiálu. U ocelí dochází k austenitizaci ve fázi ohřívání

a poté k martenzitické transformaci ve fázi následného rychlého chladnutí. Zvýšením tvrdosti martenzitické struktury dochází ke zlepšení odolnosti proti opotřebení, což je žádoucí zejména u funkčních ploch¹¹.

Kritéria pro úspěšné laserové kalení ocelí:

- Požadovaná povrchová vrstva musí být ohřátá nad austenitizační teplotu a setrvat na této teplotě po dobu homogenizace austenitu.
- Tepelně zpracovaná povrchová oblast musí být v dobrém kontaktu s adekvátním objemem základního materiálu pro intenzivní odvod tepla a samoochlazovací efekt¹¹.

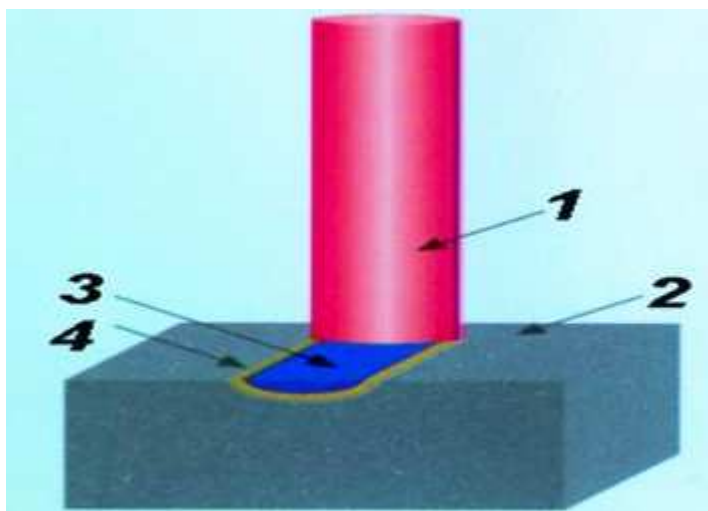
Hlavní parametry procesu, které ovlivňují výslednou strukturu zpracovaného materiálu:

- Výkon laserového parsku, velikost laserového bodu, skenovací rychlost.
- Režim laserového paprsku – tvar a energetické rozložení.
- Absorpce laserového záření povrchem materiálu.
- Materiálové vlastnosti a mikrostruktura.

Kombinace těchto parametrů má vliv zejména na tvrdost, hloubku prokalení, výslednou mikrostrukturu a pnutí¹¹.

Tab. 2.1 Typické procesní parametry při kalení¹¹

Výkon	0,5 – 10 kW
Hustota výkonu	1–100 kW/cm ²
Skenovací rychlost	5 – 400 mm/s
Hloubka prokalení	0,1 – 2,5 mm



Obr. 2.2 Princip kalení laserem⁹.

1–paprsek laseru, 2–neovlivněný povrch, 3–zakalený materiál, 4–tepelně ovlivněná oblast.⁹

3 ROZBOR PROCESU OBRÁBĚNÍ A GRAVÍROVÁNÍ ZA VYUŽITÍ TECHNOLOGIE LBM

3.1 Charakteristika LBM

Zkratku LBM – Laser Beam Machining můžeme volně přeložit jako obrábění za pomoci laserového paprsku. Toto odvětví patří k jedné z mnohých aplikací, kde je možno využít laserového záření. Mezi hlavní druhy laserů používané ve strojním průmyslu patří pevnolátkové lasery na bázi rubínu Nd:YAG, Nd:sklo, alexandrit, dále plynové lasery CO₂, He:Ne, argónový, excimerový a částečně kapalinový laser. Pro zpracování materiálů se nejčastěji používají Nd:YAG a CO₂ lasery. Nd:YAG se skládá z pevného Y₃Al₅O₁₂ (ytrium, hliník, kyslík) izometrického krystalu a obsahuje přibližně 1 % ionů neodymu (Nd³⁺). Do popředí se dostávají excimerové lasery pro opracování keramických a kompozitních materiálů, mikroobrábění tenkých kovových profilů, značení kovových předmětů a mikrořezání měkkých i tvrdých tkání v humánní medicíně¹.

3.1.1 Režimy paprsků

Lasery mohou pracovat v různých časově závislých režimech: kontinuálním, pulzním a tzv. Q - switched režimu. To je zvláštní kontinuální režim s vysokou energií impulzu. Pulzní režim vzniká přerušováním budícího elektrického výboje v dutině laseru. Q - switched režim je výsledkem zvyšování činitele jakosti optického rezonátoru při kontinuálním čerpání energie do dutiny laseru. Špičkové výkony v kontinuálním režimu jsou řádově 10^4 až 10^5 W. V pulzním režimu 10^{12} až 10^{13} W. Nejvyšší hustoty výkonu paprsku se rovněž dosahuje u Q – switched režimu¹.

3.2 Kategorizace laserů podle procesů opracování materiálů

K procesům kdy dochází k úběru materiálů patří řezání, vrtání, mikroobrábění a čištění laserem. Mikroobrábění zahrnuje přistřihování, ořezávání, značení, renovaci masek, gravírování a rytí. Čištění je odstraňování povrchové vrstvy kontaminované oleji a plyny¹.

3.3 Gravírování strojově čitelných kódů

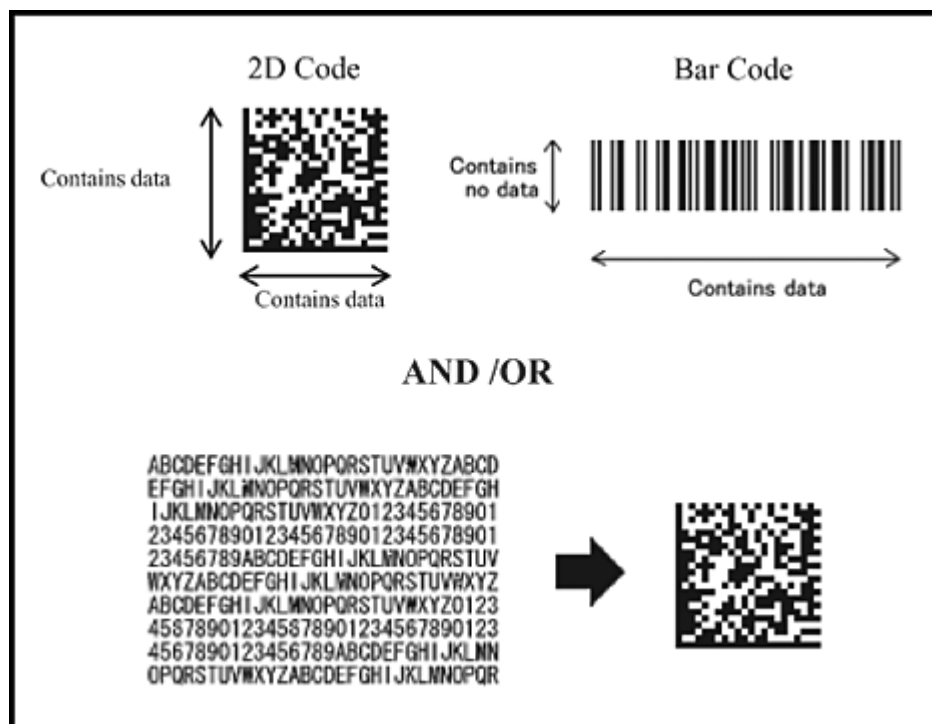
Výrobní požadavky na průmyslové značení obsahující přímé strojově čitelné kódy rostou exponenciálně. Přímé značení umožňuje sledování produktu od výroby až do konce jeho životnosti. Nároky na značení jsou umocněny rostoucími požadavky na výsledovatelnost komponentu a jedinečnou identifikaci produktu. Po 11. září 2001, výrobci implementují strategie k tomu, aby zavedli výsledovatelnost a zmařili tak falšování a napodobování produktů. Americké ministerstvo národní obrany běžně v praxi používalo tyto kódy na vojenském majetku. Dále následovali výrobci komerčních průmyslových produktů od automobilového průmyslu přes balení, výrobce léčiv, elektroniky až po spotřební zboží a převzali podobné standardy¹⁶.

Přímé značení obsahuje jedinečnou identifikační informaci, která vyžaduje digitální technologii procesu jako inkoustové značení, bodové značení nebo laserové značení. U trojrozměrných plastových produktů je laser preferovanou metodou, protože přináší vysokokontrastní nesmazatelné označení a odpadají náklady na drahý inkoust a jeho následné sušení. Navíc, lasery mohou vytvořit velice malé strojově čitelné kódy. To je důležité u mikroznačení nebo tam, kde je omezená plocha povrchu, či komponenty, která má být označena alfanumericky, logem, či blokovým schématem. U masivních výrobních operací se vyžaduje, aby všechny produkty byly 100 % čitelné bez ohledu na velikost a složitost aktuálního značení¹⁶.

3.3.1 Co jsou strojově čitelné kódy

Strojově čitelné kódy jsou kódované informace, které mohou být interpretovány pomocí optických snímačů či kamer. Důvěrně známý příklad je jednorozměrný "čárový kód", který zastupuje informace. Typický tmavý kontrast na světlém pozadí vytvoří vysokou a nízkou odrazivost, která je převedena na 1 a 0. Nejběžnější formy čárových kódů ukládají data v šířích a rozestupech tištěných rovnoběžných přímek (černobílých pruhů). Nicméně, nové vzory bodů, soustředné kružnice a textové kódy skryté uvnitř obrazů jsou také užívány. Ve Spojených státech, UPC (univerzální kód produktu) je nejznámější a nejpoužívanější čárový kód u maloobchodních a spotřebitelských produktů¹⁶.

Moderní schémata čárového kódu mohou obsahovat ASCII znakovou sadu, ty jsou potřeba ve výrobních sektorech, u elektroniky, kosmického průmyslu, automobilového průmyslu, léčiv a dalších. U těchto aplikací jsou požadovány pokročilejší strojově čitelné kódy. Požadavky na vytvoření kódu, který by zakódoval více informací v kombinaci s menšími požadavky na kapacitu paměti vedly k vývoji dvojrozměrných "data matrix" kódů. Data matrix kódy nemohou být čteny laserem (tak jako čárový kód). Tyto kódy musí být snímány kamerovým zachytávacím zařízením. 2D data matrix je revoluční strojově čitelný kód navržený k tomu, aby se omezilo používání čárových kódů¹⁶.



Obr. 3.1 Rozdíl mezi 2D data matrix kódem a čárovým kódem¹⁶.

3.3.2 Porovnání 2D data matrix a čárových kódů

2D data matrix kódy jsou ideální pro značení malých součástí a jsou navrženy k tomu, aby se nijak nepoškodily v drsném průmyslovém prostředí. Data matrix kód je 10 krát menší oproti čárovému kódu při stejném počtu zakódovaných dat. Je potřebný opravdu velmi malý prostor, na který můžeme vygravírovat kód, jež obsahuje významná výrobní data pro vysledování produktu. Každý kód je z poloviny černý a z poloviny bílý. To má za následek 50:50 šanci, že poškození členu nepoškodí jeho čitelnost. Tím, že jsou data rozptýlená po celém symbolu, jsou odolná vůči tiskacím defektům a dělají tuto metodu vysoce spolehlivou. Chybová korekční schémata implantována do algoritmu optimalizuje schopnost zotavení poškozeného symbolu¹⁶.

Tab. 3.1 Srovnání údajů 2D data matrix kódu a čárového kódu¹⁶.

	2D data matrix kód	čárový kód
Informační kapacita	přibližně 4000 znaků	přibližně 20 znaků
Druh informací	Alfanumerický znak, Kanji	Alfanumerický znak
Informační hustota	160	1
Chybová korekční schémata	zahrnuje	nezahrnuje
Kontrast (relativní k základnímu)	méně než 20%	obvykle 80% a víc
Čitelnost	360° (jakýkoliv úhel)	stálá pozice
Aplikační čas kódu (<i>laserem</i>)	milisekundy	sekundy

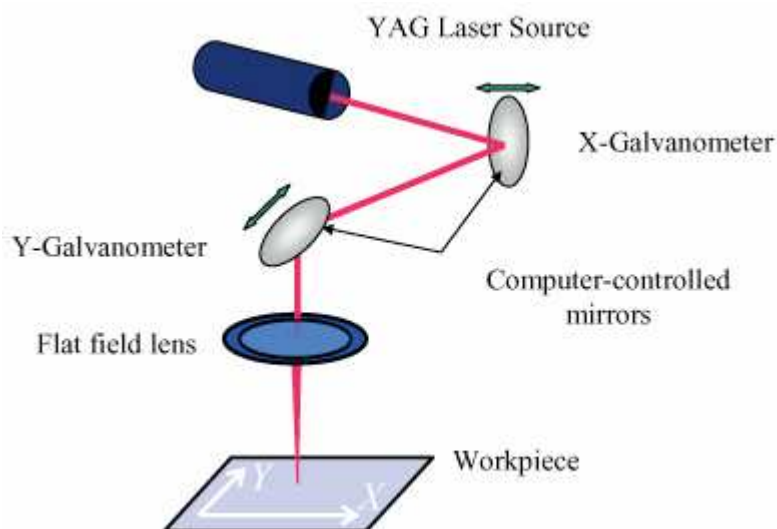
3.3.3 Laserové značení 2D data matrix kódů

Tato část se zaměřuje na používání 2D data matrix kódů u trojrozměrných součástí z plastů a jejich kompletaci (včetně nylonů, polyolefinů, polykarbonátů, polyesterů, styrenů). Tyto druhy plastů jsou chemicky netečné, nepolární s nízkými povrchovými energiemi. Pro přímé značení, se používají Nd:YAG lasery, které jsou výhodnější než inkoustové procesy jako inkjet, jež vyžadují předúpravu povrchu a sušení. Nd:YAG laser, jehož vlnová délka $\lambda = 1064 \text{ nm}$ (blízká infračervenému pásmu spektra) je populární ve značícím průmyslu kvůli jeho vlnové délce záření, nastavení výkonu, a přizpůsobivosti. To má za následek vyšší značící rychlost, vyšší kvalitu a větší produkci¹⁶.

Kontinuální CO₂ laser pracuje ve vlnové délce $\lambda = 10,6 \text{ }\mu\text{m}$ (daleko od infračerveného pásma spektra). CO₂ lasery generují mnohem nižší

špičkový výkon než YAG lasery, a proto nemohou vytvářet vysoce kontrastní označení na většině plastů. CO₂ lasery jsou běžně používány ke značení čárových kódů a data matrix kódů do štítků, papírů, proto aby nahradily inkoust¹⁶.

Hardvérové a softvérové součásti, které výrobci laserů začleňují do jejich systémů, se významným způsobem podílí na značící kvalitě a rychlosti. Primární atribut u značení povrchů je hustota energie q [W/m²], který je jiný než hrubý výstupní výkon laseru. Řízené paprsky Nd:YAG laserů určené ke značení, využívají zrcadel, které jsou namontovány na vysokorychlostní počítačem řízené galvanometri tak, aby nasměrovaly laserový paprsek kolmo k povrchu, který má být značen. Každý galvanometr, jeden na ose Y a jeden na X souřadnici, poskytuje pohyb paprsku uvnitř značícího pole. Plochá čočka zaměřuje laserový paprsek, čímž dosáhneme vysoké hustoty energie na povrchu podložky¹⁶.



Obr. 3.2 Znázornění optického systému přenosu laserového paprsku¹⁶.

Rozhodující pro značící výkon je mód laserového paprsku. Výrobci dodávají jak vícerežimový, TEM₀₀ (příčně elektromagnetický mód), tak cokoli mezi tím, včetně nízce řízeného módu. Tyto režimy výstupu se vážou k faktorům jako odlišnost paprsku a rozvod energie napříč průměrem laserového paprsku. Nízce řízené a TEM₀₀ lasery, jsou zvláště vhodné

pro vysokorychlostní značení data matrix a čárových kódů, samotných čísel a písmen, značení vlastním typem písma a komplexní grafiku. Díky schopnosti dosáhnout malého zaměřeného bodu, můžeme vytvořit úzké linky s přesně stanovenými okraji¹⁶.

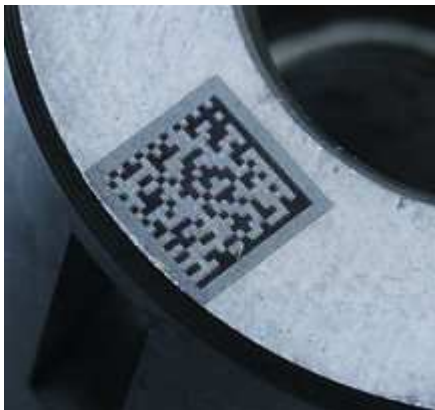
Hustota energie je funkcí velikosti zaostřeného bodu laseru. Velikost zaostřeného bodu laseru pro jakoukoliv ohniskovou vzdálenost čočky a vlnovou délku laseru je funkcí úchylky laserového paprsku, který je řízen konfigurací laseru, módem vybírajícím velikost díry a rozšiřovačem paprsku. Rychlost opakování pulsů a maximální hustota energie jsou kritické parametry pro vytvoření popisu a dosažení optimálního kontrastu a rychlosti. Vysoký špičkový výkon při nízké frekvenci rychle zvyšuje povrchovou teplotu. Materiál se vypařuje a dojde pouze k minimálnímu přenosu tepla do základního materiálu. Tím, jak se zvyšuje rychlost opakování pulsů, dochází u nižšího špičkového výkonu k minimálnímu vypařování, ale k vytváření většího množství tepla¹⁶.

Použitím laserových doplňků zlepšíme a optimalizujeme kontrast strojově čitelných kódů a snížíme čas značícího cyklu. V konečném důsledku tyto faktory šetří peníze a zvyšují výrobní produkci. Tohle řešení je cenově příznivé, snadno použitelné a nemá žádné nežádoucí vlivy na produkty¹⁶.

3.3.4 Aplikace 2D data matrix kódů

Vynikajícím aplikačním příkladem je 2D data matrix kód vygravírovaný laserem na díly, které se nacházejí v drsném prostředí okolo motorového prostoru. Např. palivové součásti vyrobené z acetalů, nylonů a polyesterů. Jak je uvedeno v tabulce 3.1 čas pro vyznačení kódu je přibližně 200 ms. Data obsažená v kódu zahrnují plnou dohledovatelnost komponenty (od dávky materiálu, typu stroje, přes data směnových časů až po zkoušky těsností). Nové technologické pokroky u laserového značení acetalů se vyvíjejí v oblasti sériovosti produktů a jejich výsledovatelnosti. Velký význam v průmyslu má nesmazatelné mikroznačení kritických informací a data matrix kódů u konce automatizovaných operací, po nichž následuje testování. Unikátní

značení také přináší prospěch místnímu řízení zásob pro práci během procesu¹⁶.



a)



b)

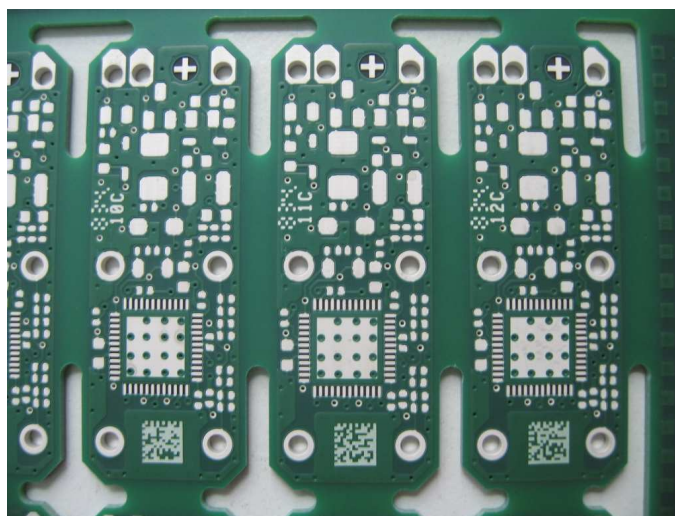
Obr. 3.3 2D data matrix kódy a) na kovech¹⁷, b) na plastech¹⁶.

Moderní strojové čtecí systémy nejsou jen samostatné inspekční zařízení. Častěji jsou integrovány do celkových výrobních operací včetně statistických kontrol jakosti. Pokročilé systémy zahrnují umělou inteligenci, která dále rozšiřuje oblast použití laserů a strojově čitelných kódů. Zahrnování laserového značení do procesů je vnímáno jako rozhodující člen k úspěšnému poskytování odezvy procesů a chybové prevence, pro produkty vyráběné téměř bez neshodných kusů¹⁶.

3.4 Použití značících laserů v automobilovém průmyslu

3.4.1 CO₂ laser

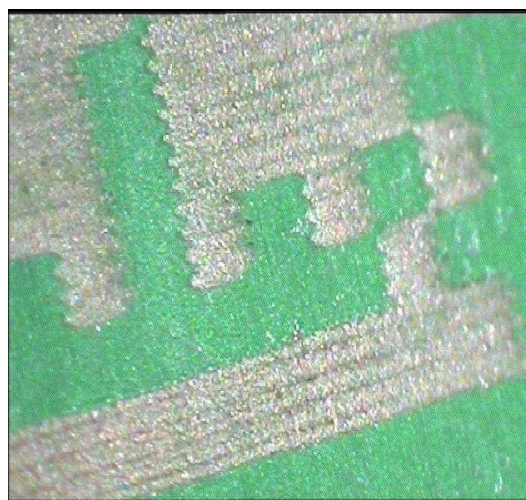
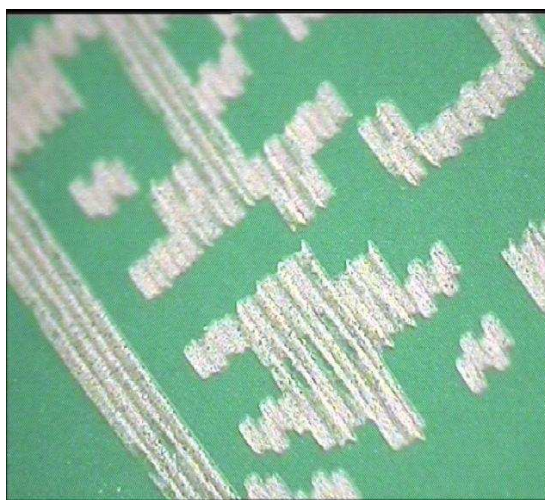
Vysoké požadavky zákazníků na kvalitu a odstranění příčin výroby neshodných kusů mají za následek, že každá deska vstupující do procesu osazování musí být označena data matrix kódem.



Obr. 3.4 Označené desky plošných spojů.

Byly provedeny testy značení vzorků. Po otestování čitelnosti čtecím zařízením, byl tento kód prohlášen jako bezpečně čitelný. Dále pak byla naznačena celá řada různých desek plošných spojů a kódy byly značeny různými výkonnostními parametry. Veškeré kódy byly podrobeny testu čtení.

Dále byla prověřena hloubka značení v závislosti na neporušení masky až na měď viz.(obr. 3.5). Kontrola pod mikroskopem prokázala, že kódy jsou v pořádku.



Obr. 3.5 Vizualní kontrola kódů.

3.4.2 YAG laser

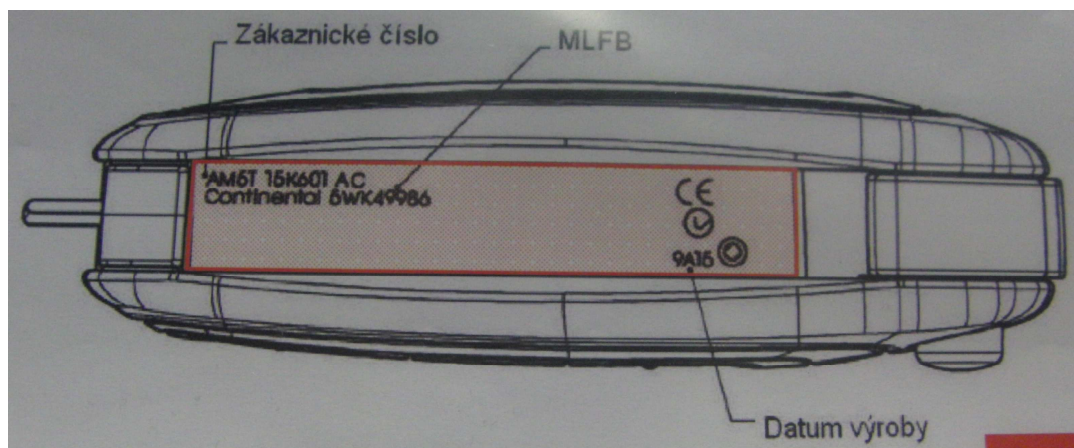
V současnosti nalezneme v automobilech celou řadu dílů vyrobených z plastů. Jedná se o tzv. „housingy“, což jsou krabičky, kryty, skříně, atd. Tyto díly je také zapotřebí označovat nebo popisovat, a to z důvodů uvedených

v předchozí kapitole. Pro kvalitní kontrast a čitelnost popisu se používají plasty obohacené o pigmenty.



Obr. 3.6 Výrobní data na plastové krabičce.

Další uplatnění laseru v procesu výroby pro automobilový průmysl je např. homologační popisování.



Obr. 3.7 Homologace klíčků.

4 VLASTNÍ EXPERIMENT

Cílem experimentu je zjistit optimální nastavení vláknového laseru v gravírovací operaci zahrnující gravírování reliéfů do klišé, na které se následně nanáší a stírá barva. Hodnotí se míra odebraného materiálu a kvalita povrchů gravírovaných ocelových klišé.

4.1 Materiály a zařízení

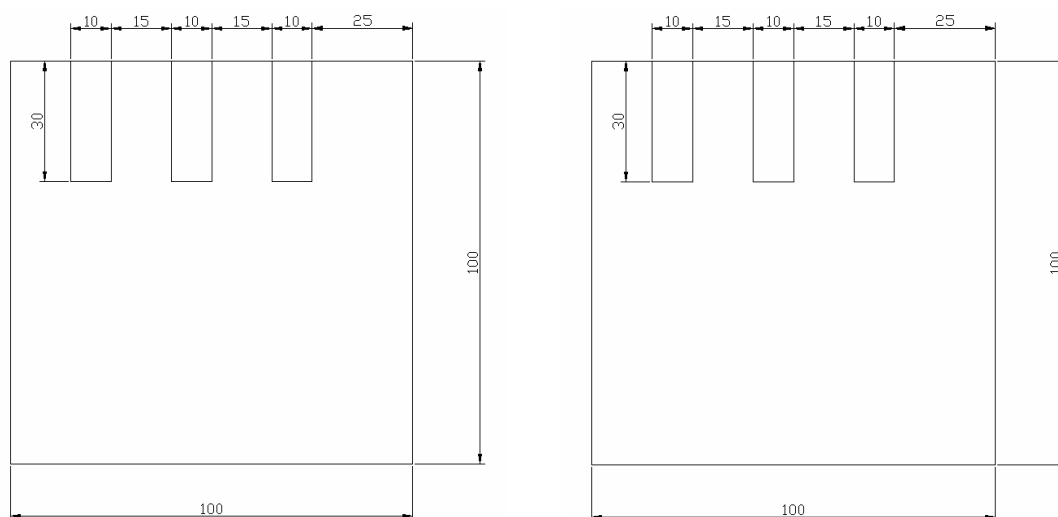
Efektivita laseru byla hodnocena na ocelových klišé o šířkách profilů 0,253 mm a 0,246 mm dodávaných firmou Tampoprint. K laserovému gravírování se používají dva druhy klišé Aloxid a Microflex. Ty jsou buď hliníkového nebo ocelového základu. V tomto případě se pracovalo s Microflex, což je speciální materiál patentovaný firmou Tampoprint. Tyto klišé jsou použitelné, jak pro CO₂, tak pro YAG lasery. Životnost klišé je až 20000 tisknutí²⁴.

K experimentu byl použit vzduchem chlazený ytterbiový vláknový laser 4. třídy s maximálním výkonem 20 W a akustooptickou modulací (AOM) světelného svazku s frekvencí 2000 - 80000 Hz. Vláknó, které má funkci aktivního prostředí, se čerpá zářením z laserových diod. Vláknový laser tvoří kompaktní blok, z něhož je vyvedeno vlákno umístěné v ochranném kordu. Laser je instalován v prostoru řídicí elektroniky. Výstup vlákna je zakončen oddělovačem, který zamezuje zpětnému průniku laserového záření směrem do laseru. Činnost laseru kontroluje interní řídicí počítač. Vychylovače svazku jsou klíčovou součástí zařízení. Jsou použity galvanometrické vychylovače s kapacitním snímačem polohy. Kapacitní snímač spolu se zpětnou vazbou umožňuje vysokou přesnost a stabilitu vychylování (nelinearita 0,015 %, přesnost 2 μ rad, tj. při objektivu s ohniskovou vzdáleností 100 mm, je přesnost polohy až 0,2 μ m). Důležitá je také rychlost vychylování. Použité vychylovače spolu s řídicí elektronikou mají dobu přeběhu z jedné krajní polohy do druhé (vychylovací úhel 40°) maximálně 4 ms. To odpovídá rychlosti popisu 2,5 m/s. Vychylování je řízeno počítačem. Propustnost tohoto řadiče je až 10000 xy bodů/s. Celé zařízení je řízeno PC (není součástí zařízení),

ten připravuje data pro řadič vychylovačů, komunikuje s kontrolním počítačem laseru a obsluhou²⁶.

4.2 Podmínky pro experiment

Střední výkon (P_m), frekvence opakování pulsů, energie pulzu (E) a pulzní výkon (P_p), hrají důležitou roli při laserovém gravírování. Vysoká hustota energie a vysoká frekvence opakování pulzů jsou nezbytné k odebírání materiálu²⁵.



Obr. 4.1 Návrh vzorků ke gravírování.

4.3 Vytváření projektů

Zpracování projektů pro gravírování – řezání je díky ovladačům laseru přístupné ze všech kompatibilních programů, které mají výstup na **Tisk**. Změna parametru laseru se provádí ve **Vlastnostech** tisku²⁷.

4.3.1 Pravidla pro nastavení programu

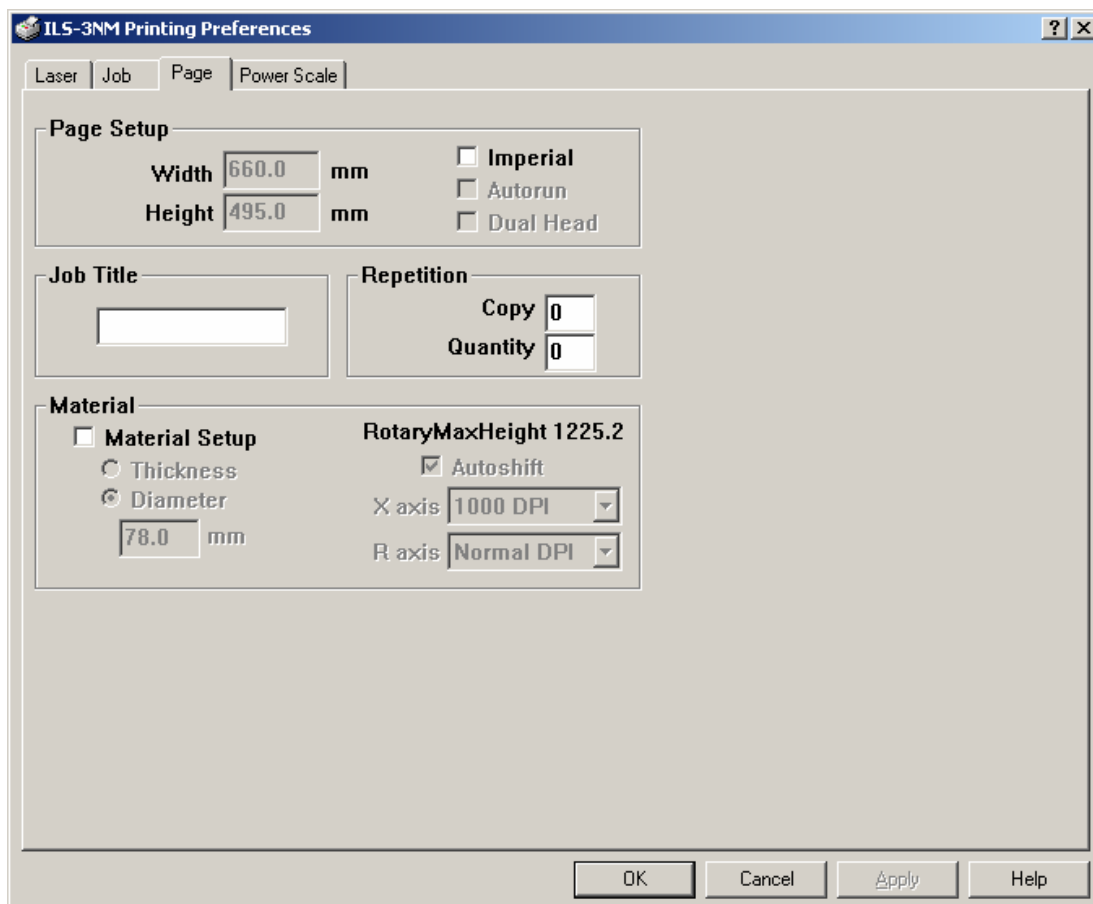
1. ve vlastnostech stránky programu ovládající laser se nastaví velikost stránky dle popisovacího pole laseru. Tedy na **660 x 495 mm**.

2. pro barevné označení objektů určených pro značení se používají pouze barvy RGB spektra²⁷:

- a. černá
- b. červená
- c. zelená
- d. žlutá
- e. modrá
- f. fialová
- g. azurová
- h. oranžová

4.3.2 Popis funkce ovladačů

Před samotným výstupem se klikne ve vlastnostech **Tisk** na položku **Vlastnosti**.



Obr. 4.2 Nastavení materiálových položek v řídicím programu²⁷.

Page setup – nastavení velikosti popisovacího pole, nastaveno dle modelu laseru.

Job title – jméno projektu, zobrazované na grafickém rozhraní laseru.

Imperial – mění jednotky, ve kterých pracují ovladače **mm** nebo **palce**.

Autorun – po odeslání tiskové úlohy ji začne laser ihned vykonávat.

Dual Head – nastavení pro systémy osazené více jak jedním laserovým zdrojem a optikou²⁷.

Repetition

Copy – laser bude značit daný projekt opakovaně podle číselného zadání bez přerušení.

Quantity – projekt bude označen opakovaně dle nastavení. Mezi každým značením je nutné ruční spuštění z ovládacího panelu laseru.

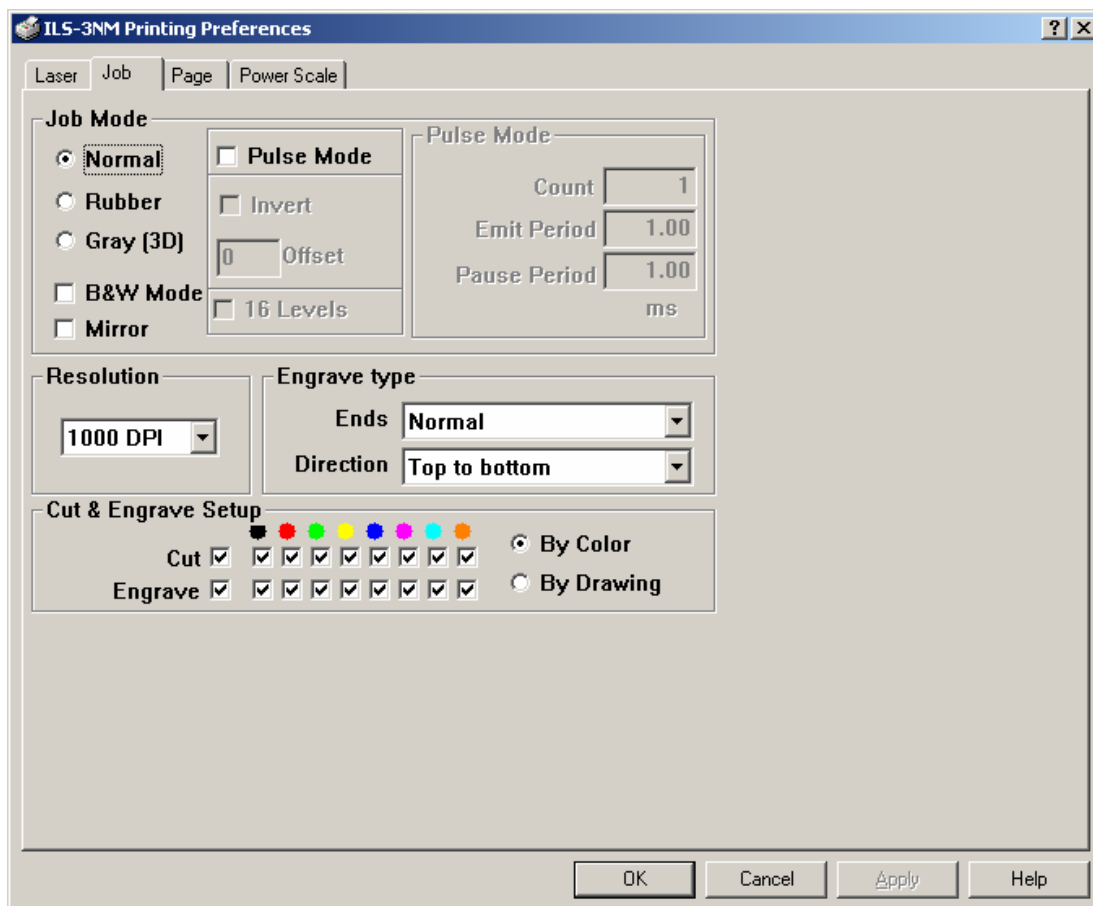
Material

Tato funkce slouží pro nastavení značení na rotační ose laseru.

Diameter – udává se průměr značeného předmětu.

X axis – změna rozlišení v ose X.

R axis – změna rozlišení pro rotační osu²⁷.



Obr. 4.3 Nastavení parametrů pracovního programu²⁷.

Normal – standardní mód ovládání laseru využívající osmi základních barev RGB spektra. Určeno pro gravírování a řezání.

Pulse mode – slouží pro vrtání otvorů. Pouze černá barva je vhodná pro tuto funkci.

Rubber – slouží pro tvorbu razítek a plastického gravírování.

Ivert – laser nebude zpracovávat rastrem pokrytá místa, ale jen ty, jež jsou prázdná - bílá. Doporučuje se používat pro tuto funkci pouze černobílou grafiku.

Offset – automaticky upravuje gravírovanou plochu.

Gray 3D – rastrová grafika bude automaticky převedena do 256 odstínů šedi v případě zaškrtnuté položky **16Levels** se převede do šestnácti bitové palety šedi a každý pixel se bude gravírovat samostatně. V tomto módu se používá nastavení **Power Scale**.

B&W mode – převede barevný rastrový obrázek na černobílý, a pro gravírování se použije nastavení černé barvy.

Mirror – tento parametr otočí značenou pracovní plochu grafického programu podél horizontální osy.

Resolution - změní hustotu bodů na měrnou jednotku palce. Nemění velikost bodu. Větší rozlišení je určeno pro zlepšení kvality, gravírování však trvá déle a povrch se více zahřívá. NEPLATÍ pro řezání.

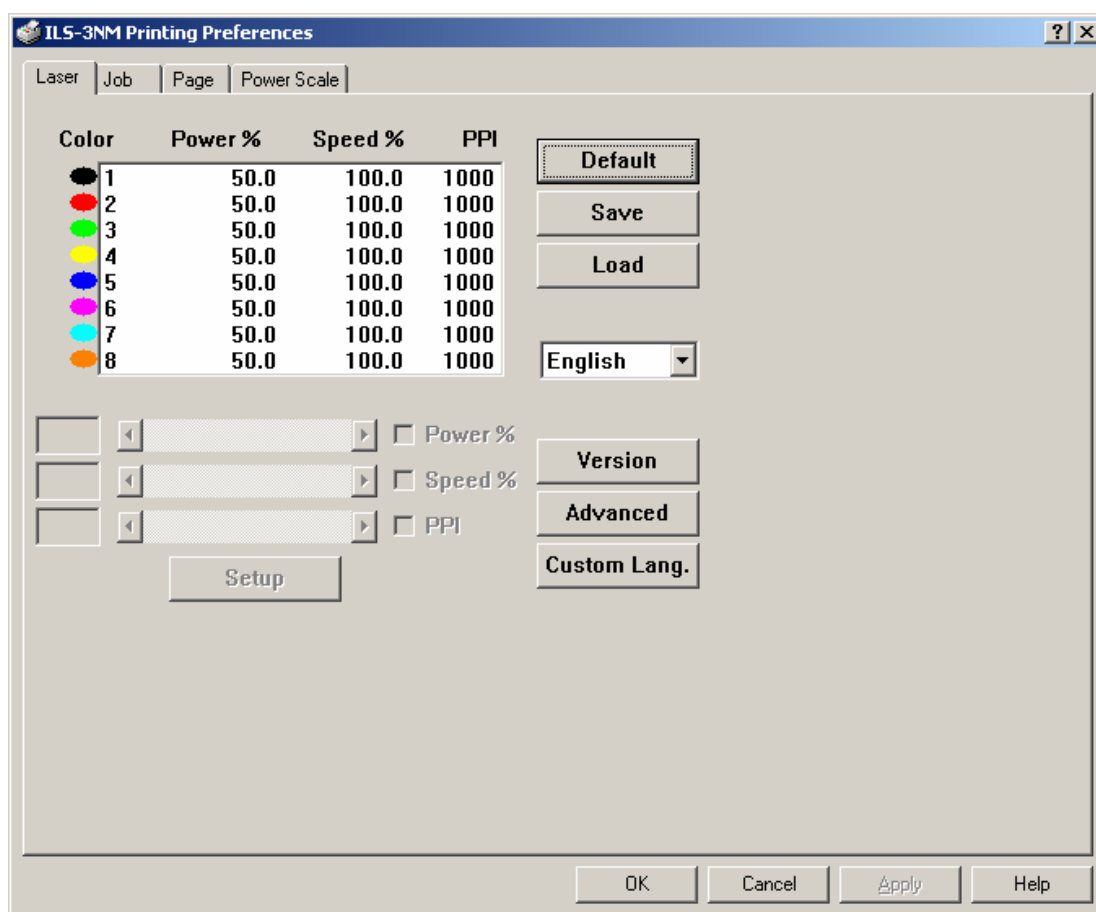
Ends – upravuje kvalitu při gravírování a řezání, buď standardní, nebo zlepšenou.

Direction – určuje směr pohybu čocky při gravírování z horní nebo dolní části objektů.

Cut & Engrave Setup – zapíná a vypíná řezání či gravírování dle zvolené barvy. Tato funkce umožňuje volbu pořadí vykonání řezání a gravírování:

By drawing: dle vložení vektorů při tvorbě objektu.

By color: dle pořadí určené barvami, počínaje z leva doprava²⁷.



Obr. 4.4 Nastavení parametrů laseru v řídicím programu²⁷.

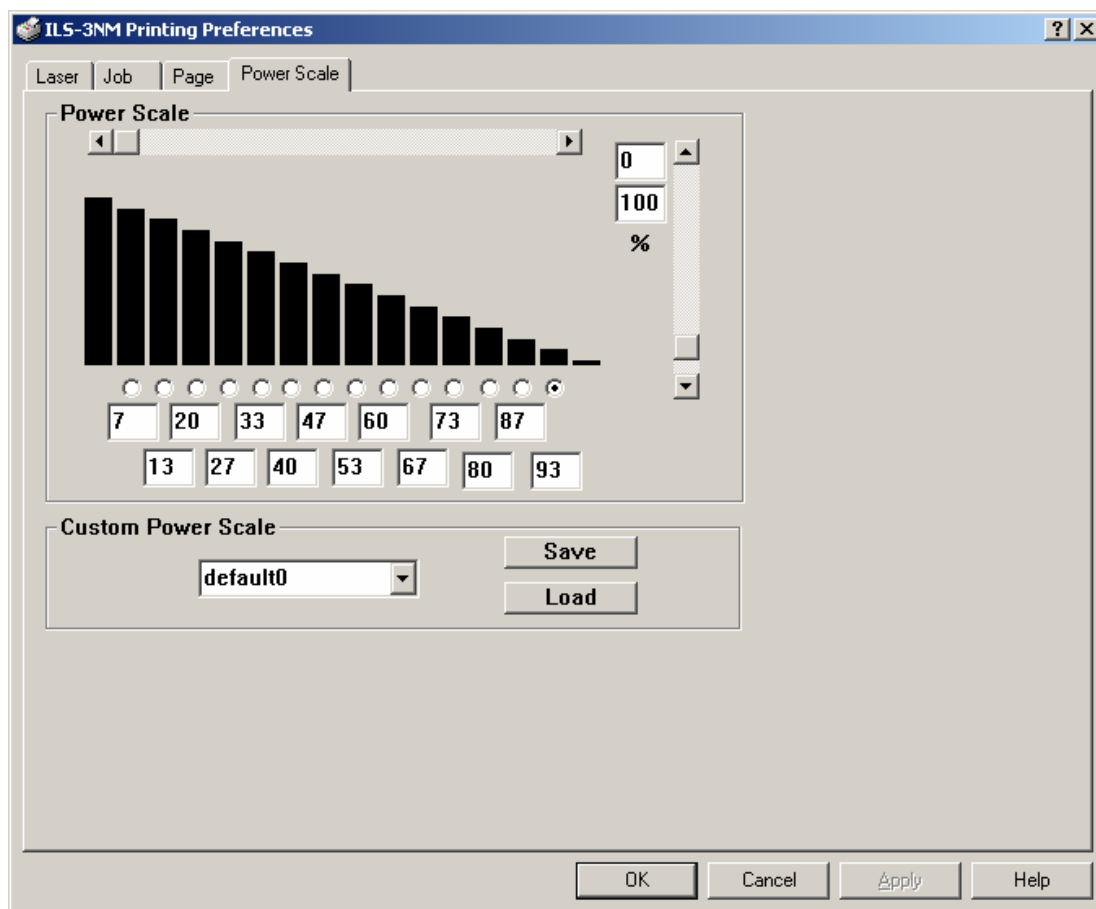
V hlavní části tohoto okna se nastavují parametry pro každou z osmi barev:

- Power – výkon
- Speed – rychlost značení
- PPI – rozlišení pulsů na měrnou jednotku palce, tohle nastavení je platné pouze pro řezání.

Změna hodnoty se dá provést pomocí tažení myši nebo přímým vložení údajů z klávesnice. Pokud se označí více barev, nastavení je platné pro všechny označené barvy. Po dokončení změn nastavení je nutné kliknout na tlačítko **Setup**. Použité parametry se dají uložit a zpětně nahrát pomocí tlačítek **Save (uložit)** a **Load (nahrát)**.

Default – vrátí veškerá nastavení pole **Laser** do základní pozice.

Custom Lang. – slouží pro překlad uživatelského rozhraní laseru²⁷.



Obr. 4.5 Nastavení parametrů výkonů v pracovním programu²⁷.

Tohoto nastavení se používá v případě zapnutí funkcí:

Rubber – mění nastavení zužujících se částí při plastickém značení a u tvorby razítek.

Gray 3D a 16 level - slouží pro nastavení výkonu dle odstínů šedi.

4.3.3 Ovládání provozu laseru

Úspěšné uložení projektu do paměti laseru je oznámeno dvojitém zvukovým signálem. Pro přechod na značený projekt se používá tlačítko **NEXT**. Spuštění projektu se aktivuje tlačítkem **RUN**. Pozastavení prováděné akce se děje pomocí tlačítka **PAUSE**. Opětovné spuštění umožňuje tlačítko **RESUME**.

4.3.4 Spuštění projektu

1. V grafickém programu se vytvoří projekt pro gravírování.
2. Před odesláním na tisk je třeba změnit parametry v sekci **Tisk-Vlastnosti**.
3. Projekt je odeslán na tisk.
4. Kliše se vloží do gravírovacího stroje a pomocí šipek na ovládacím panelu se nastaví správná ohnisková vzdálenost.
5. Kalibrace v osách posuvů X a Y z menu **Systém Setup-Position setup-X-Y homing**, a její verifikace.
6. Do paměti laseru je načten soubor pro gravírování.
7. Dojde k uzavření ochranných dvířek.
8. Kontrola funkčnosti odsávání.
9. Spuštění procesu gravírování²⁷.

4.4 Sledované veličiny a použitá měřidla

Parametr kvality povrchu obrobené plochy.

Struktura povrchu:

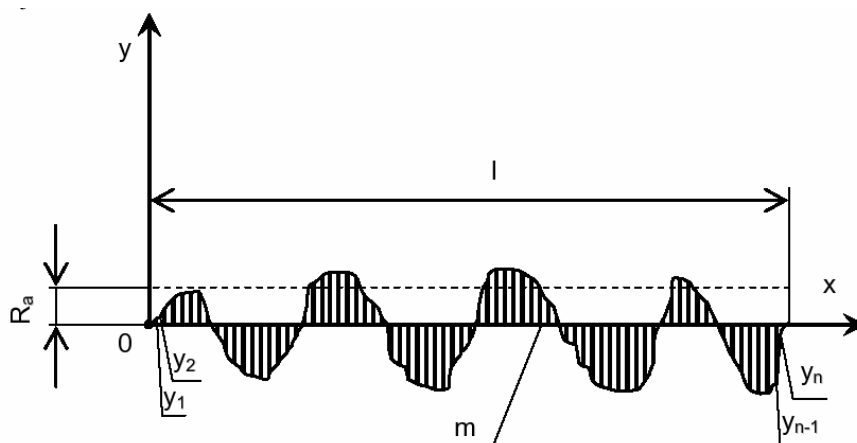
Ra – průměrná aritmetická úchylka profilu.

Rz – největší výška profilu.

Ra je střední aritmetická úchylka profilu tj. střední aritmetická hodnota absolutních hodnot úchylek **yi** profilu v rozsahu základní délky **l**.

Absolutní hodnoty úchylek se odečítají ke střední aritmetické čáře profilu **m**, která rozděluje skutečný profil tak, že v rozsahu základní délky jsou součty ploch po obou jejích stranách stejné.

Drsnosti povrchů vygravírovaných dutin byly měřeny pomocí profiloměru Mahr Perthometer M2, jehož měřicí rozsah je do 150 μm. Měření probíhalo na délce 5,6 mm po dobu 6 s.

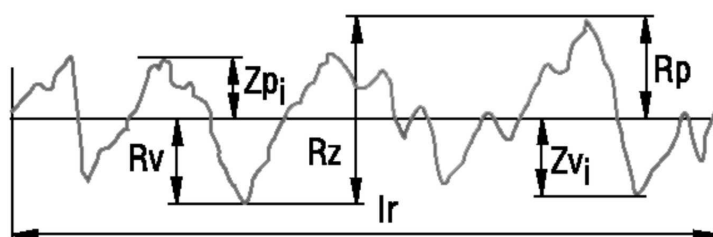
Obr. 4.6 Střední aritmetická úchylka²⁹.

m – střední čára profilu

R_a – střední aritmetická úchylka profilu

y_i – hodnota úchylky i -tého bodu profilu od střední čáry profilu l

R_z – maximální výška profilu: je to součet výšky nejvyššího výstupku R_p a hloubky nejnižší rýhy R_v uvnitř základní délky l_r . Z_{p_i} je hodnota i -té rýhy výstupku a Z_{v_i} je hodnota i -té rýhy žlábků²⁹.

Obr. 4.7 Maximální výška profilu²⁹.

Tloušťky klišé a hodnoty odebraných vrstev.

Tloušťky klišé a hodnoty hloubek odebraných vrstev z klišé byly měřeny pomocí digitálního třmenového mikrometru Mitutoyo Digimatic 293-522-30, jehož rozsah je 0 - 25 mm.

Hodnocení přechodové hrany a povrchů.

Vyhodnocovaly se šířky profilů povrchových vrstev, přechodové hrany mezi obrobeným a neobrobeným materiálem, povrchy materiálu, struktura a velikosti zrn.

Skeny byly pořízeny na skenovacím elektronovém mikroskopu Philips XL 30 v SE módu, což je snímání pomocí sekundárních elektronů. Vzorky prošly procesem očištění a nauhličení povrchové vrstvy. Řezy profilů vzorků byly připraveny pomocí metalografického výbrusu.

4.5 Aplikace laseru v reklamním průmyslu

Spolupráce proběhla s brněnskou firmou Reda a.s., která se zabývá značením, gravírováním a potiskem reklamních a dárkových předmětů. Jedná se o českou firmu, založenou v roce 1991 s více než 200 zaměstnanci a ročním obratem přesahujícím 600 mil. Kč. Tato společnost má kromě svého sídla v Brně ještě další čtyři obchodní zastoupení, a to v Praze, Plzni, Zlíně, Ostravě. Dceřinné společnosti jsou v rámci Evropy a Asie na Slovensku, v Polsku a čínském Ningbo²³.

4.6 Proces tampónového tisku

Vláknový laser, jež je používán při procesu tampónového tisku, se v tomto odvětví využívá ke značícím a gravírovacím operacím, zahrnujícím gravírování reliéfů do klišé, na které se následně nanáší a stírá barva. Aby docházelo k lepšímu ulpívání barvy po setření, není stopa laseru vyhotovena kolmo na ostří stěrky, nýbrž pod úhlem 45 °. Rozdílná hloubka a drsnost povrchu zapříčiní, že barva ulpí pouze v námi požadovaném vygravírovaném profilu. Poté dochází k přenesení barvy na tampón ze silikonového kaučuku a následně na předmět, který má být potištěn. Technologie tampónového tisku je vyjímečná tím, že dokáže potisknout i nerovné a různě oblé plochy. Čas na vytvoření jednoho tisku odpovídá hodnotě okolo 4s (záleží na šikovnosti obsluhy). Tento proces zahrnuje umístění předmětu, na který se bude tisknout, do přípravku. Nanesení barvy

na kliše, setření přebytečné barvy pomocí stírací lišty, sjetí tampónu a převzetí svrchní lepivé vrstvy barvy z kliše. Vyjetí tampónu a jeho pohyb vpřed, v současnou chvíli se opět nanese barva na kliše. Následuje sjetí tampónu a předání požadovaného obrazce z tampónu na potiskovaný předmět.



Obr. 4.8 Proces tampónového tisku

Kontrola výsledných potisků se provádí vizuálně nebo pomocí lupy. Sleduje se ostrost hran a kontrast tištěných nápisů, log, obchodních značek a symbolů.



Obr. 4.9 Výsledný potisk reklamního předmětu.

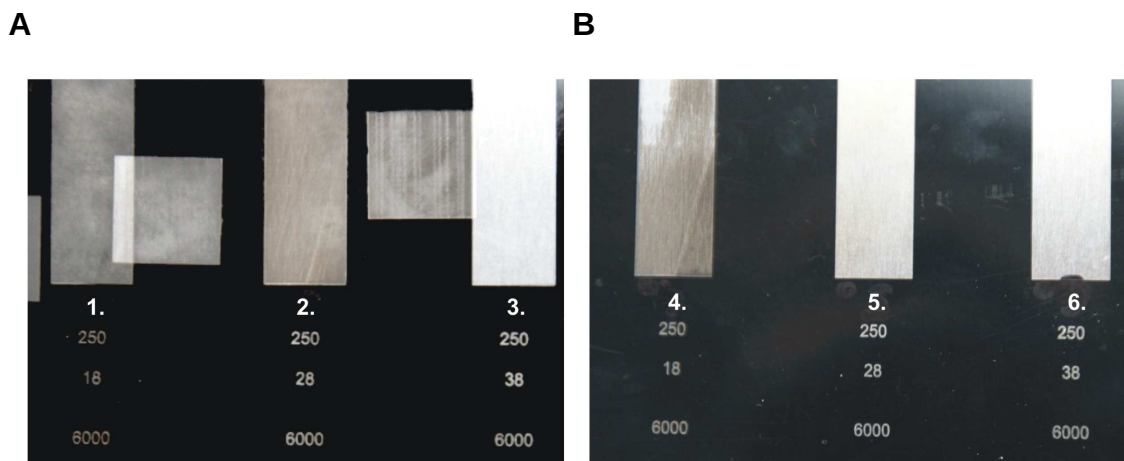
Na obr. 4.10 můžeme pozorovat nedokonalosti zejména na hranách natištěného loga. V následující části se bude práce touto problematikou hlouběji zabírat a zjišťovat příčiny vzniku těchto nerovností.



Obr. 4.10 Detail potisku loga.

4.7 Průběh experimentu

Laserovým gravírováním dvou klišé bylo vytvořeno šest vzorků o rozměrech 30 x 10 mm. Tyto vzorky byly získány proměnnou hodnotou výkonu laseru (P) od 1,8 až 3,8 W, konstantní skenovací rychlostí (S) 250 mm/s a pulsní frekvencí (F) 6000 Hz. Klišé A bylo gravírováno bez opakování, tzn. pouze jednou (R) 1, kdežto klišé B se gravírovalo dvakrát (R) 2. Šířka paprsu byla stanovena na hodnotě 0,11 mm.



Obr. 4.11 Kliše microflex (A) s jedním přejezdem; (B) se dvěma přejezdy laserového paprsku.

4.8 Výsledky a rozprava

Z těchto snímků lze pouhým okem vypožorovat, že výkon 1,8 W použitý u vzorků č. 1 a 4 i výkon 2,8 W u vzorku č. 2, není dostačující k odstranění povrchové vrstvy, což je základní podmínkou pro vyhotovení kvalitního reliéfu a následného tampónového tisku. Pro přesnější vyhodnocení povrchů se dále tyto vzorky zkoumaly při 25-ti násobném zvětšení viz. obr. 4.13.

Tab. 4.1 Gravírovací parametry.

kliše	vzorek č.	rychlost [mm/s]	výkon [W]	frekvence [Hz]	opakování
A	1	250	1,8	6000	1
	2		2,8		
	3		3,8		
B	4		1,8		2
	5		2,8		
	6		3,8		

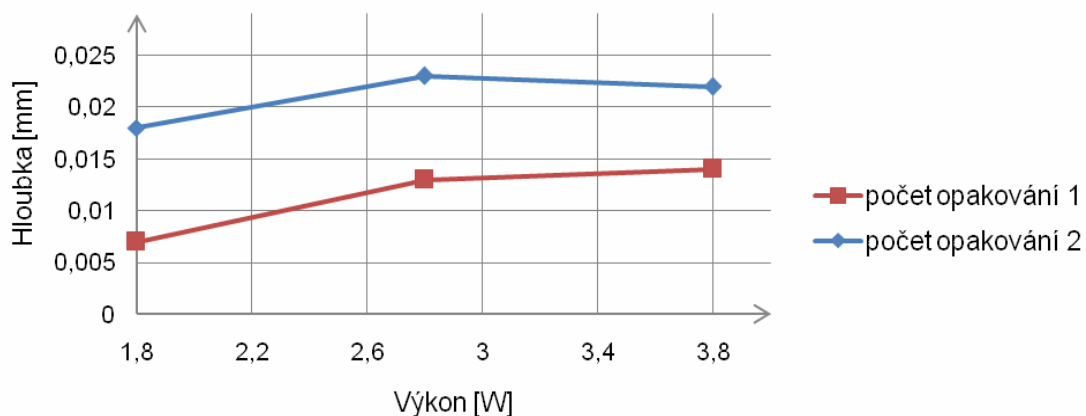
Tab. 4.2 Parametry struktury povrchu.

kliše	vzorek č.	parametr Ra [μm]	parametr Rz [μm]
A	1	0,993	6,28
	2	1,177	7,40
	3	0,191	1,27
B	4	1,992	8,21
	5	0,174	1,67
	6	0,161	1,50

Nejmenší drsnosti povrchu bylo dosaženo u vzorku č. 6. Parametry drsnosti přibližující se hodnotě R_a 0,160 μm a R_z 1,50 μm , se k tomuto účelu ukázaly jako vhodné. Drsnosti povrchů menší než předchozí hodnoty mohou být nevhodné, a to z důvodu nedostatečného ulpívání barvy ve vygravírovaném reliéfu.

Tab. 4.3 Parametry hloubky odebraného materiálu.

klišé	šířka profilu klišé [mm]	vzorek č.	šířka obrobeného profilu [mm]	odebraný materiál [mm]
A	0,246	1	0,239	0,007
		2	0,233	0,013
		3	0,232	0,014
B	0,253	4	0,235	0,018
		5	0,230	0,023
		6	0,231	0,022



Obr. 4.12 Závislost hloubky odebraného materiálu na výkonu laseru.

Na obr. 4.13, klišé A, **vzorku č. 1** došlo k laserovému úběru povrchové vrstvy při výkonu laserového paprsku 1,8 W, rychlosti 250 mm/s, frekvenci 6000 Hz a jedním přejezdem. Důsledkem tohoto nastavení bylo odstranění vrstvy o tloušťce 0,007 mm, což při tloušťce povrchové vrstvy 0,021 mm, není dostačující. Došlo pouze k odpaření lesklé vrstvy. Tohle nastavení je vhodné pro odstraňování velmi jemných nečistot z různých povrchů.

Vzorek č. 2: nastavené parametry laseru odpovídají hodnotám: výkon 2,8 W, rychlost 250 mm/s a frekvence 6000 Hz, se místy začíná objevovat základní materiál, nicméně odebrání materiálu o tloušťce 0,013 mm, stále neodpovídá požadované hodnotě.

Vzorek č. 3: vytvořen výkonem 3,8 W, rychlostí 250 mm/s, frekvencí 6000 Hz, také jedním přejezdem laserového paprsku. Tloušťka odebraného materiálu byla 0,014 mm. Tyto parametry nastavení mohou být vhodné pro odpaření tenkých vrstev např. laků nebo nátěrů.

Vzorek č. 4: je patrné, že i při dvojnásobném přejezdu laserového paprsku je při výkonu 1,8 W, rychlosti 250 mm/s a frekvenci 6000 Hz, odebrána nedostatečná povrchová vrstva. Tloušťka odebraného materiálu byla 0,018 mm.

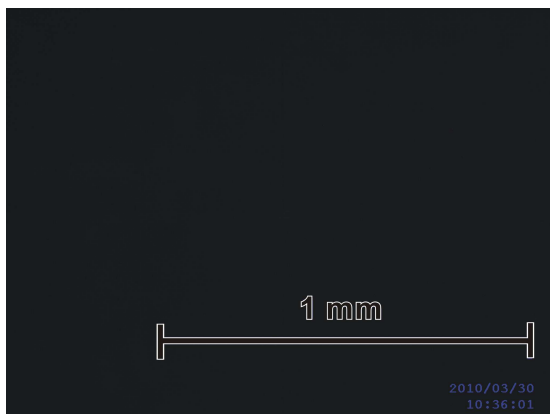
Vzorek č. 5: nastavené hodnoty laseru odpovídají hodnotám: výkon 2,8 W, rychlost 250 mm/s, frekvence 6000 Hz a počet přejezdů 2. V některých místech jsou stále patrné zbytky černého povrchového nátěru, to může způsobit nedokonalé nanesení barvy (ostrůvky bez barvy) na výsledném potisku. U tohoto vzorku bylo dosaženo největšího úběru materiálu, a to 0,023 mm, ale díky nedostatečnému výkonu se stále nedosahuje požadované kvality reliéfu.

Vzorek č. 6: vytvořen výkonem 3,8 W, rychlostí 250 mm/s, frekvencí 6000 Hz. Tento cyklus byl opakován na stejném místě, tzn. laserový paprsek přešel plochu 2x. Výsledkem tohoto nastavení bylo odstranění vrstvy o tloušťce 0,022 mm, což je při tloušťce povrchové vrstvy 0,021 mm a výkonu 3,8 W dostačující. Na vzorku nejsou patrné žádné pozůstatky po nátěru, povrchová

vrstva je odstraněna až na základní materiál. Takto připravený vzorek odpovídá požadavkům na tampónový tisk.

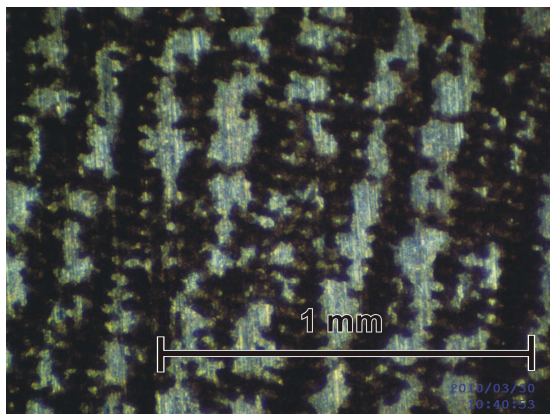
klišé A

vzorek č.1

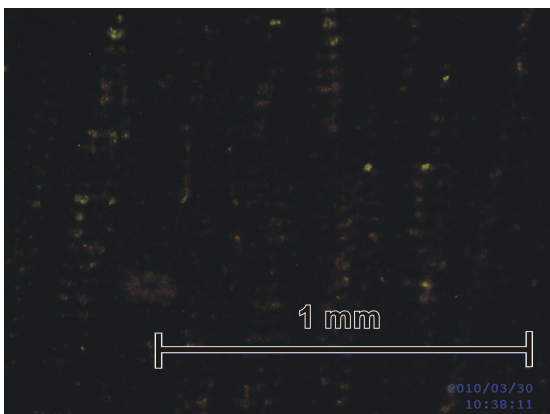


klišé B

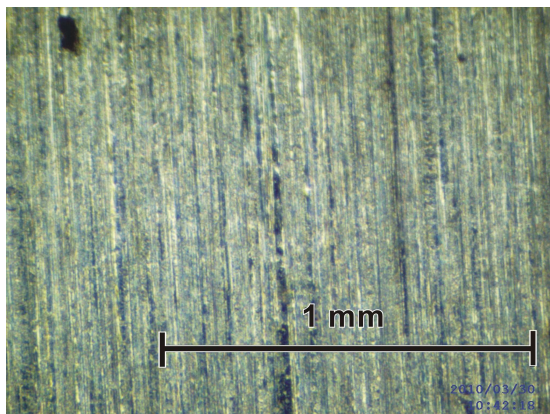
vzorek č. 4



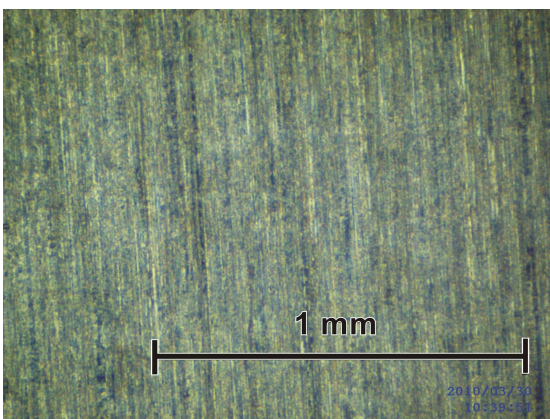
vzorek č. 2



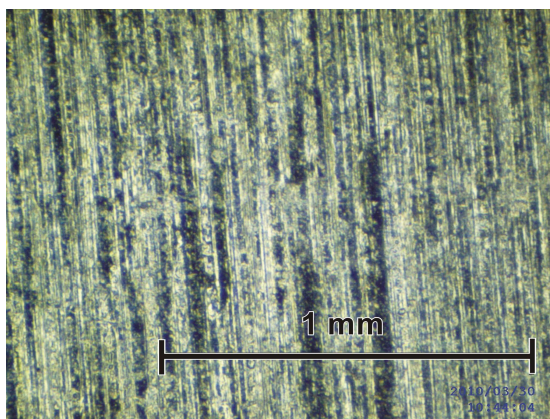
vzorek č. 5



vzorek č. 3



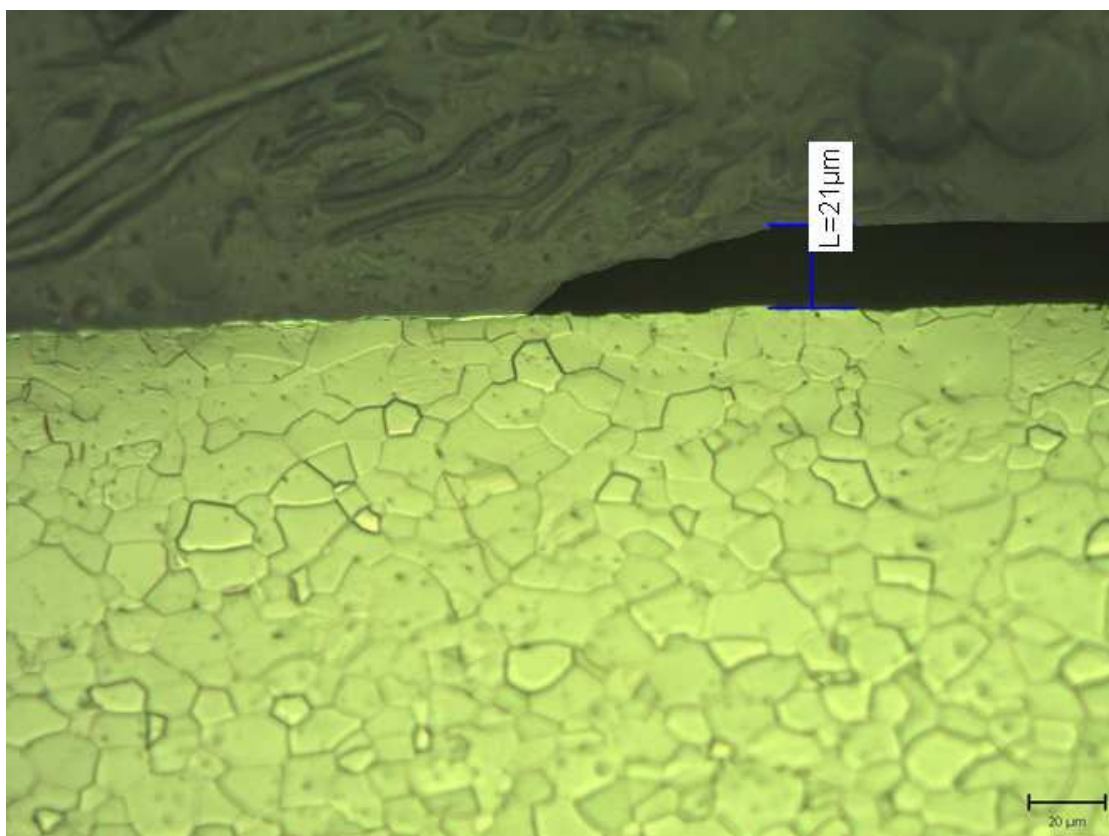
vzorek č. 6



Obr. 4.13 Ukázka vygravírovaných povrchů.

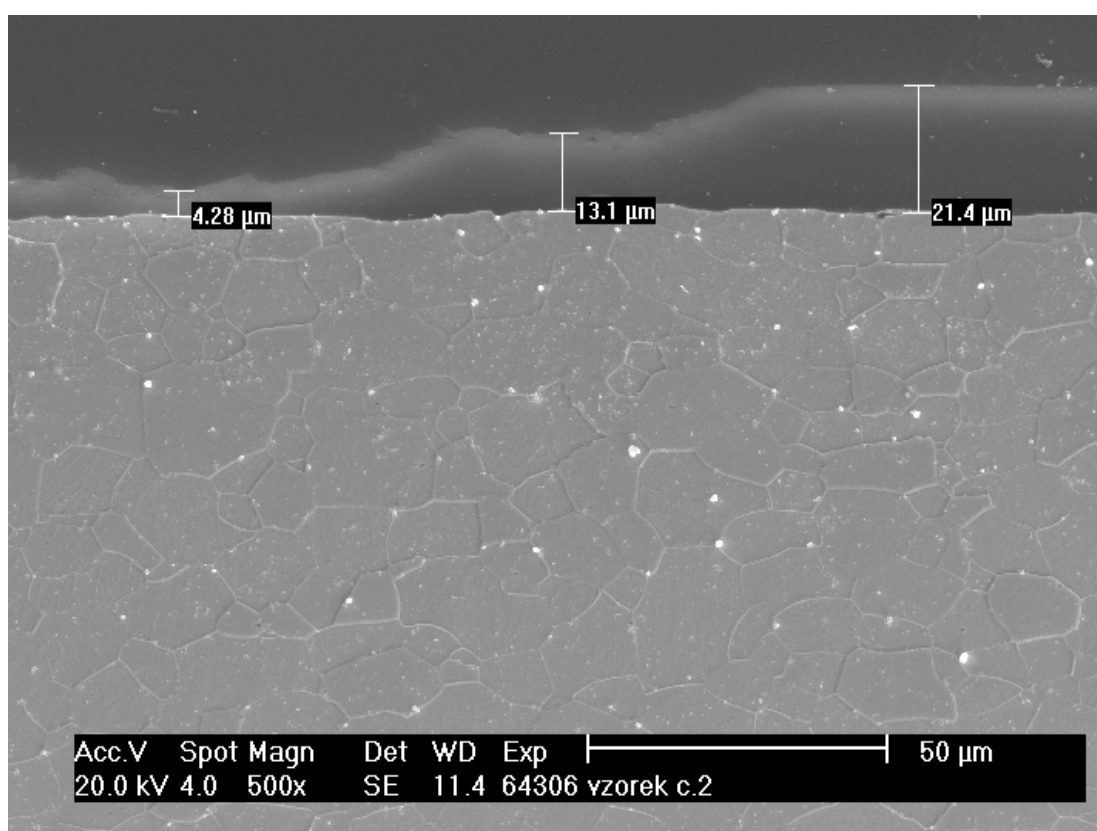
Na obr. 4.14 můžeme pozorovat konstantní šířku profilu povrchové vrstvy o velikosti $L = 21 \mu\text{m}$, což je jeden z požadavků na dodavatele klišé. Šířka profilu menší než $20 \mu\text{m}$ nebo nekonstantní tloušťka může zapříčinit snížení počtu cyklů tampónového tisku a nepříznivě ovlivnit kvalitu výsledného potisku.

Také není patrné, že struktura a velikost zrn byly nějak ovlivněny působením laserového záření.



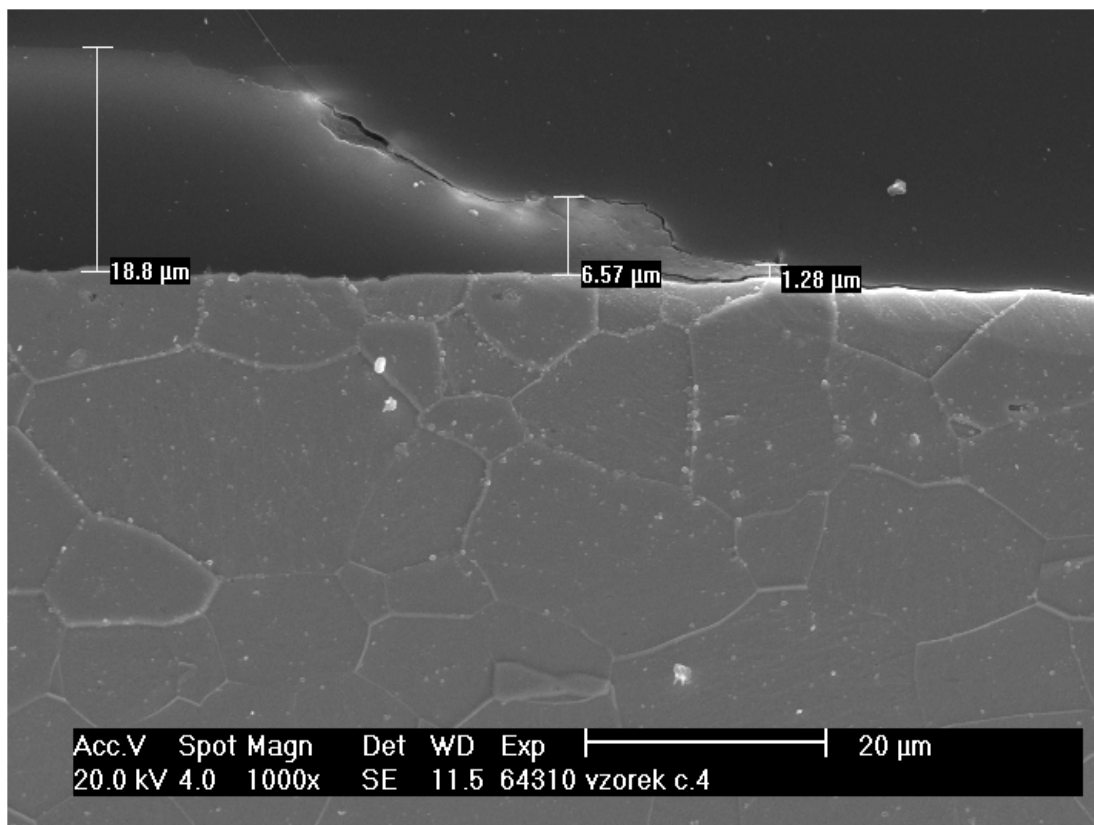
Obr. 4.14 Metalografický výbrus vzorku č. 6.

Na obr. 4.15 je zobrazen profil vzorku č. 2. Snímek je oproti skutečnosti 500x zvětšený. Pozorujeme vyhodnocení pozvolného úběr materiálu, při nastavených gravírovacích parametrech laseru viz. tab. 4.1. Nedochází zde k celkovému odstranění povrchové vrstvy až na základní materiál. Úhel hrany mezi obrobenou a neobrobenou plochou je nízký. To by mělo za následek nekvalitní výsledný potisk, realizace tisku se v tomto případě nedoporučuje.



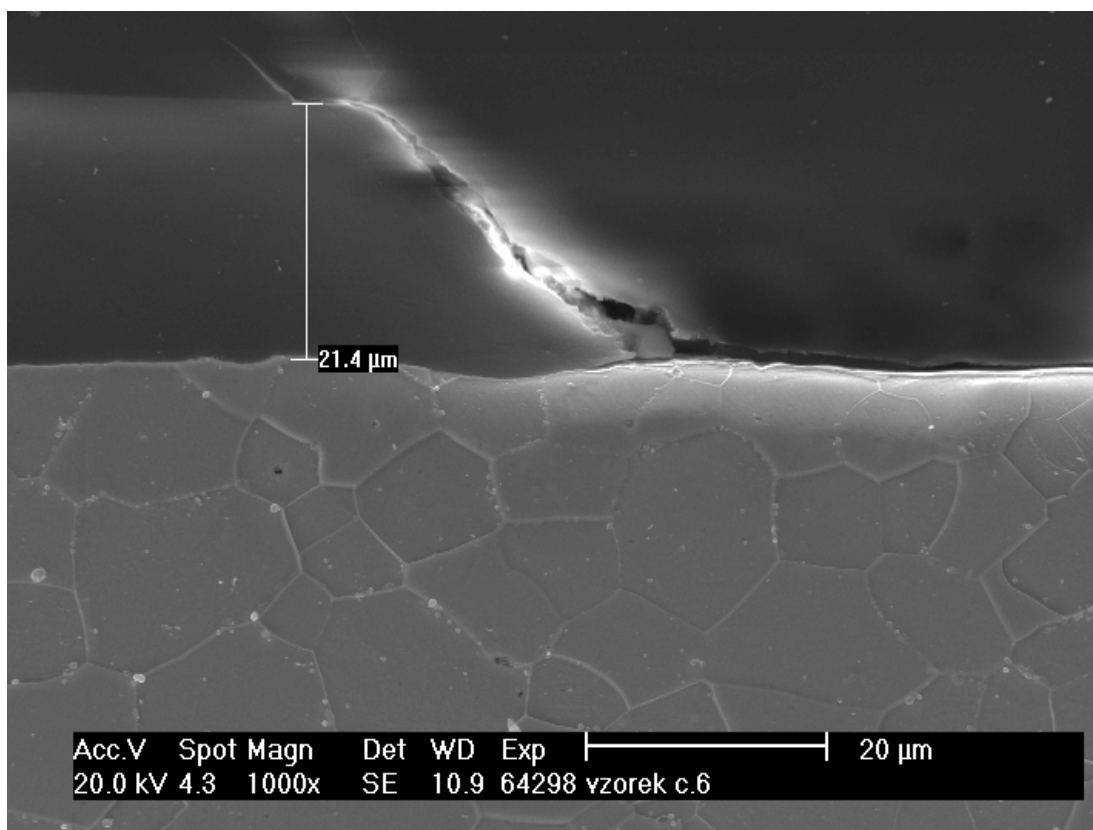
Obr. 4.15 Snímek řezu profilu vzorku č. 2.

Na obr. 4.16 se sleduje profil vzorku č. 4, který je 1000x zvětšený. V tomto případě dochází k odstranění povrchové vrstvy až na základní materiál. Nastavení laseru odpovídá parametrům uvedených v tab. 4.1, pro vzorek č. 4. Úběr materiálu je oproti předchozímu vzorku značný. Úhel hrany mezi obrobenou a neobrobenou plochou se zvyšuje na hodnotu $28^{\circ}46''$, ale není postačující. Takto vygravírovaný reliéf by měl za následek vytvoření nekонтрастního potisku s nekvalitní konturou obrazce. Realizace tisku v tomto případě také není vhodná.



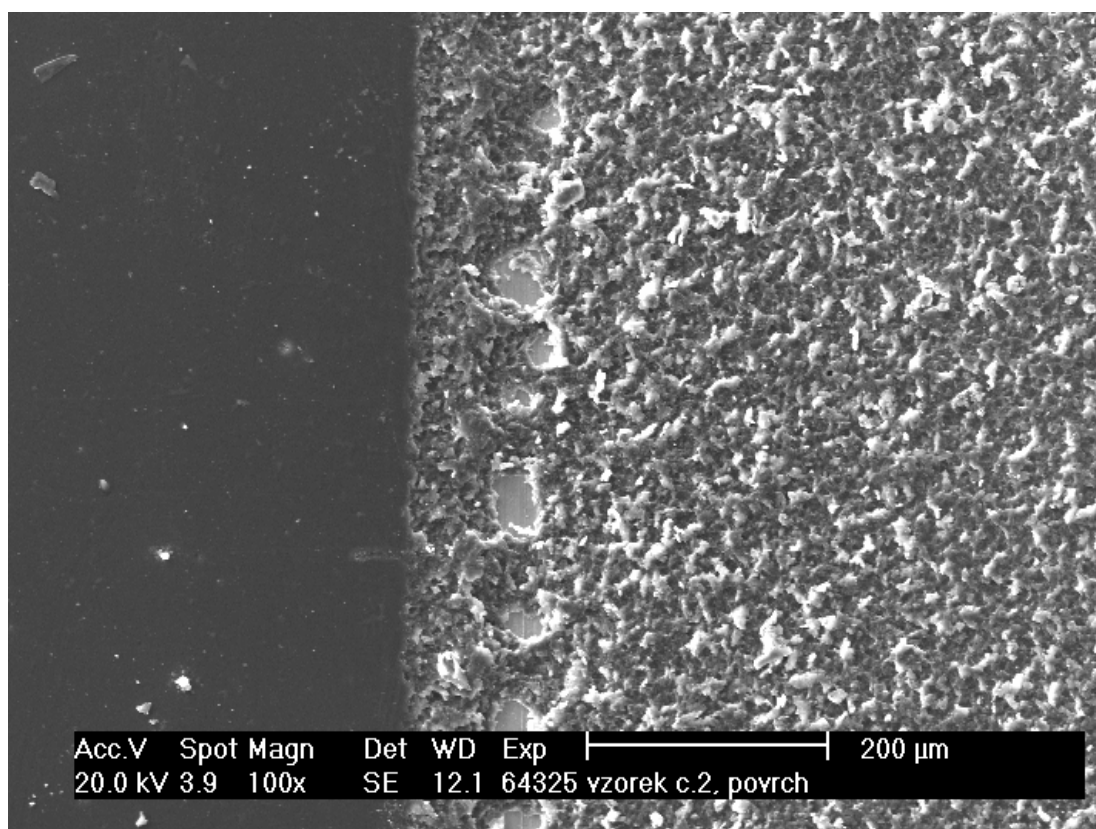
Obr. 4.16 Snímek řezu profilu vzorku č. 4.

Na obr. 4.17 se vyhodnocuje profil vzorku č. 6, jehož zvětšení je 1000x. V tomto případě dochází k odstranění povrchové vrstvy až na základní materiál bez zbytků povrchového nátěru. Nastavení laseru odpovídá parametrům uvedených v tab. 4.1, pro vzorek č. 6. Úhel hrany mezi obrobenou a neobrobenou plochou je opět vyšší, blíží se $44^{\circ}17''$. Ideální úhel, pro vytvoření dokonale kontrastního tisku je 90° . Tohoto úhlu by se dalo dosáhnout opětovným přejetím obrysu reliéfu laserovým paprskem o vysokém výkonu. Nicméně, dosažení těchto výsledků se jeví jako postačující a realizace tisku je v tomto případě vhodná.



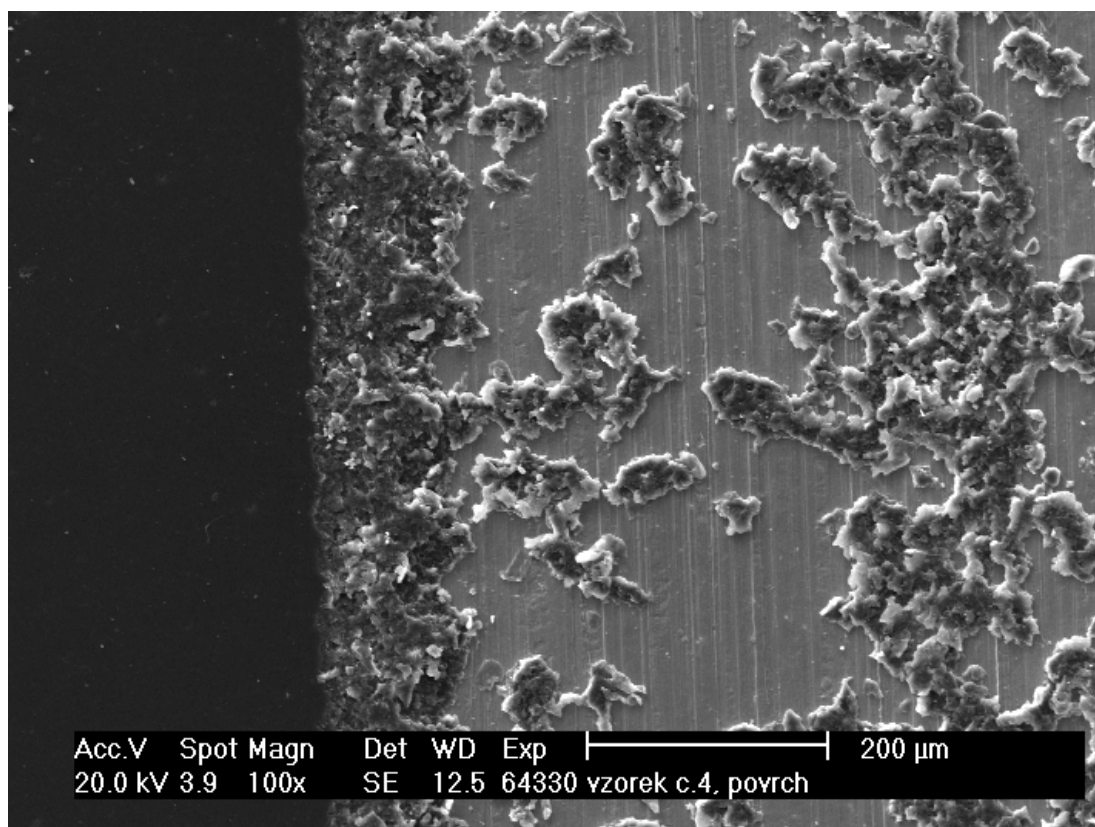
Obr. 4.17 Snímek řezu profilu vzorku č. 6.

Na obr. 4.18, jež je 100x zvětšený oproti realitě, je zobrazen povrch vzorku č. 2. Černá plocha na levé straně obrázku je neobrobený povrch. Na pravé straně snímku se pozoruje struktura povrchové vrstvy nátěru po odebrání 0,013 mm materiálu. Jsou zde patrné malé plochy odpařeného materiálu až na samotný plech. To je způsobeno zpomalováním laserového paprsku u hranice s neobrobenou plochou. To znamená, že v místech, kde je povrchový nátěr odpařen až na základní materiál, působil laserový paprsek po delší dobu, a tím došlo k lokálnímu odpaření většího množství materiálu.



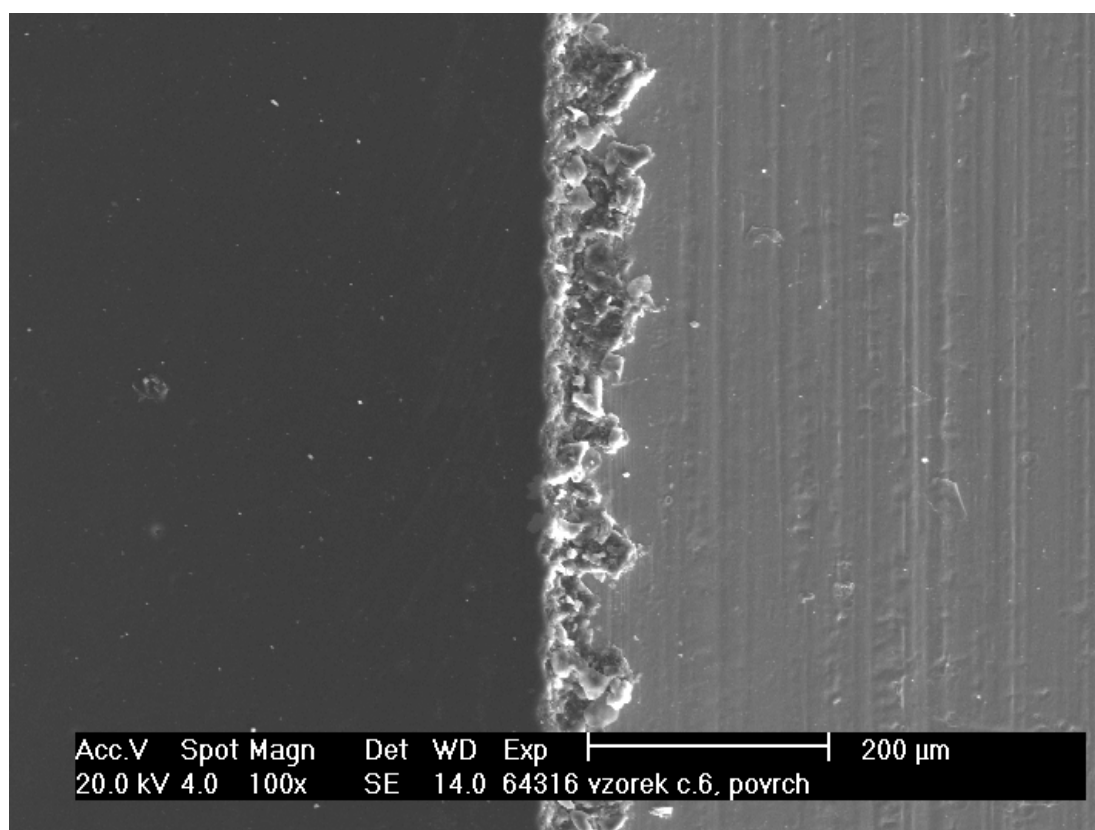
Obr. 4.18 Snímek povrchu vzorku č. 2.

Na obr. 4.19 se 100 násobným zvětšením, je zobrazen povrch vzorku č. 4. Na levé straně snímku je černá plocha, což je neobrobený povrch. Na pravé straně snímku se sleduje struktura povrchové vrstvy nátěru po odebrání 0,018 mm materiálu. Lze vysledovat zbytky povrchového nátěru, jež jsou zastoupeny v hojné míře. Také je zde viditelná neostrá hranice mezi obrobenou a neobrobenou plochou.



Obr. 4.19 Snímek povrchu vzorku č. 4.

Na obr. 4.20, který je oproti skutečnosti 100x zvětšený, je zobrazen povrch vzorku č. 6. Černá plocha na levé straně obrázku je opět neobrobený povrch. Na pravé straně snímku není patrný žádný zbytkový materiál povrchového nátěru. Jsou zde viditelné pouze stopy po válcování základního materiálu. Odebraná tloušťka materiálu dle tab. 4.3 je 0,022 mm. Patrná je také neostrá hranice mezi obrobenou a neobrobenou plochou. K dosažení ostrého přechodu mezi obrobenou a neobrobenou plochou, dosáhneme přejetím obrysu reliéfu laserovým paprskem o vysokém výkonu. Takto připravený povrch vzorku je vhodný k použití v aplikaci tampónového tisku.



Obr. 4.20 Snímek povrchu vzorku č. 6.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

5.1 Reklamní průmysl

Původní technologie, která předcházela gravírování, byla ruční rytí. Rytci pracovali s různě členitými nástroji a vytvářeli nápisy, erby a ornamenty. Také tuto technologii používali ke zdobení nejrůznějších předmětů. Postupem času se tento obor ubíral k vytváření informačních tabulí a reklamních předmětů. V současné době gravírovací stroje nahradily původní způsoby výroby.

Gravírovací stroje lze rozdělit do skupin na:

- pantografy (manuální stroje využívající šablon písma nebo předloh ornamentů, uspořádaná ramena mají na jedné straně vodící kolík a na opačné straně nástroj, např. gravírovací frézu),
- gravírovací plottery (počítačem řízené stroje, kde je fréza vedená na základě počítačového návrhu, pohyb frézy je zabezpečen pomocí krokových motorů),
- laserové gravírovací stroje (nejmodernější, vynikají přesností, flexibilitou, rychlostí, snadnou obsluhou a trvalostí výsledného popisu, není zde žádný mechanický nástroj, to znamená, nedochází k žádnému otupení a odpadají tak náklady spojené s pořízením a výměnou nástroje)²⁸.

5.1.1 Zhodnocení laserového gravírování klišé

V tomto případě nelze mluvit o nějaké masové využitelnosti laseru. Proto se ani nesledují výrobní náklady na jeden kus, či hodinové využití stroje. Četnost laserovacích operací závisí na počtu zakázek a velikosti sérií. V podstatě lze říci, že pokud je stírací břit na tiskařském stroji v naprostém pořádku, jsme schopni z jednoho vygravírovaného reliéfu vytisknout sérii o 20 000 kusech.

Náklady na pořízení vláknového laseru činí 285 000 Kč, v ceně je zahrnuto odsávání, doprava stroje a jeho instalace. Cena jednoho kusu klišé Microflex o rozměrech 100 x 100 mm je 98 Kč. Náklady na provoz laseru jsou 6 Kč/hod, což zahrnuje vstupující energie a pravidelnou údržbu. Částky byly čerpány z nabídek a materiálů firem REDA a.s. a MediCom a.s.



Obr. 5.1 Vláknový laser s příslušenstvím.

5.2 Porovnání technologií laserového popisování a termotransferového tisku etiket z hlediska výrobních nákladů v automobilovém průmyslu

Ke značení a popisování výrobků se v automobilovém průmyslu používají tři základní technologie:

- Přímé značení laserem – nejpoužívanější, 3x levnější než tištěné etikety,
- značení pomocí lepících etiket (termotransferový tisk), s tím související další náklady na lepení etiket pomocí aplikátoru, další nevýhodou a příčinou ústupu etiket je, že mohou být nalepeny pouze na vnější straně přístroje,
- inkoustový tisk, který se v současné době v těchto aplikacích příliš nepoužívá, a to z důvodů ekonomických a nesplňování požadavků na čistotu na pracovišti.

Automaticky značící laserový systém ALS 04 od firmy ASYS, používán ve firmě Continental, slouží ke značení desek plošných spojů data matrix kódy.

Tab. 5.1 Kalkulace nákladů laserového pracoviště ASYS.

Pořizovací náklady zařízení	3 750 000 Kč
Odpisové období	10 let
Časové vytížení	7944 hod/rok
Náklady na provoz stroje	208,8 Kč/hod
Výrobní náklady na 1 kus	0,08 Kč

Náklady na výrobu lepících etikety pomocí termotransferevého tisku jsou 0,24 Kč/ks. Tyto hodnoty vychází z materiálových podkladů firmy Continental Automotive Systems Czech Republic s.r.o.



Obr. 5.2 CO₂ laser ALS 04.

ZÁVĚR

V praktické části bylo vyhodnoceno působení laserového paprsku na klišé Microflex, které je určeno právě ke gravírovacím operacím. Velký důraz byl kladen na posouzení povrchu klišé po odebrání povrchového nátěru laserovým paprskem. Zkoumání se zaměřovalo zejména na kontrolu přechodové hrany mezi obrobeným a neobrobeným povrchem a kontrolu zbytkových částic na povrchu vygravírované plochy. U realizovaného experimentu byl prokázán vliv nárůstu výkonu vláknového laseru na povrch gravírovaného klišé. Při daných podmínkách opracování vzorků dle tab. 4.1, vyhovoval pouze vzorek č. 6. viz. obr. 4.17 a 4.20. I když je z obr. 4.20 patrná nedokonale opracovaná hrana, takto připravený vzorek odpovídá současným požadavkům na tampónový tisk.

Důsledky nekvalitního výsledného potisku jsou zapříčiněné nízkým úhlem přechodu obrobené a neobrobené hrany klišé, jak je možno pozorovat na obr. 4.16. Úhel hrany dosažený u vzorku č. 4 na obr. 4.16 je $28^{\circ}46'$. Úhel hrany u vzorku č. 6 na obr. 4.17 je $44^{\circ}17'$, což současným požadavkům vyhovuje. Je zde přímá souvislost mezi kvalitou opracování klišé a kvalitou výsledného potisku. K dosažení vyšší kvality výsledného potisku a vytvoření ostrého přechodu mezi obrobenou a neobrobenou plochou klišé, může být dosaženo následným přejetím obrysu reliéfu laserovým paprskem o výkonu 3,8 W, rychlosti 250 mm/s a frekvenci 6000 Hz.

Výsledky této práce jsou studií, kterou je možno dále podrobněji rozvinout. Např. k vytvoření elektronické knihovny implementované přímo do gravírovacího zařízení, kde pro každý materiál a povrch budou přednastaveny pracovní parametry laserového paprsku. Díky vysoké účinnosti laseru a schopnosti odebírat i těžkoobrobitelný materiál, je možno technologii laserového gravírování využít např. k vytváření forem pro výrobu břitových destiček.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technologie*. Vienaľa Košice, 2000. 270s. ISBN 80-7099-430.3.
2. VRBOVÁ, Miroslava. *Lasery a moderní optika*. Praha : Prometheus, 1994. 474 s. ISBN 80-85849-56-9.
3. NIEMZ, Markolf H.. *Laser-tissue interactions : fundamentals and applications*. Berlín : Springer -Verlag, 2004. 305 s. ISBN 3-540-40553-4.
4. *Laserové technologie* [online]. 2008 [cit. 2010-03-19]. Dostupné z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/nav_ind_las>.
5. ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace* [online]. c2002, [cit. 2010-03-21]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>>.
6. *Procesy CO2 laseru* [online]. 2008 [cit. 2010-03-19]. Dostupné z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_laserco2>.
7. HUMÁR, A. *Technologie I.: Technologie obrábění – 3. část.* [online]. [cit. 2010-02-22]. 57 s. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>.
8. ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění 4. díl : Laser LBM .* [online]. [cit. 2010-02-22]. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>.
9. ŘASA, Jaroslav, JINDROVÁ, Radka. *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem.* [online]. [cit. 2010-02-22]. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>.
10. *Aplikace průmyslových laserů* [online]. 2009 [cit. 2010-03-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.medicom.cz/p.php?p=prumyslove,aplikace>>.
11. *Laserové kalení* [online]. 2010 [cit. 2010-04-01]. Dostupné z WWW: <<http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-kaleni>>.
12. TRUMPF GMBH. *TRUMPF Bild-Datenbank* [online]. [cit. 2010-03-24]. Dostupný z WWW: <<https://www.mytrumpf.com/pictures/>>.
13. *Rofin - Lasers for Industry* [online]. 2008 [cit. 2010-03-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.rofin.com/index-e.htm>>.
14. KUBÍČEK, Jaroslav, MRŇA, Libor. *Technické aspekty svařování laserem. Svařák.cz* [online]. neznámé [cit. 2010-03-29], s. 11. Dostupný z WWW:<http://www.svarak.cz/f/svarak/p/PDF%20%C4%8DI%C3%A1nky/PDF_%C4%8Cesky/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20laserem.pdf>.

15. DUCHAŇ, Martin; HONNER, Milan. *Tepelné zpracování laserem s využitím robota* [online]. 2009 [cit. 2010-03-19]. Dostupné z WWW: <http://laser.zcu.cz/files/pdf/strojarstvo_2009_7-8_str_37-38.pdf>.
16. SABREEN, Scott R. *Laser Marking and Machine Vision Codes for Product Security & Traceability* [online]. 2008 [cit. 2010-04-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.plasticsdecorating.com/articlesdisplay.asp?ID=76>>.
17. *Industrial marking* [online]. 2009 [cit. 2010-02-21]. Dostupné z WWW: <http://www.trotec.net/_Industrial+Marking/_en-US/_220+Metals_Industy+and+Material.htm>.
18. *Laser Cutting* [online]. 2010 [cit. 2010-04-20]. Dostupné z WWW: <http://www.corusgroup.com/en/responsibility/education/picture_gallery/general/>.
19. *Laser Welding* [online]. 2006 [cit. 2010-04-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.ptlaser.com/capabilities-laser-welding.php>>.
20. *Drilling with light* [online]. 2004 [cit. 2010-04-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.optoiq.com/index/display/article-display/196912/articles/industrial-laser-solutions/volume-19/issue-1/features/drilling-with-light.html>>.
21. *Trumpf: Laser Marking Machines* [online]. 2010 [cit. 2010-04-21]. Dostupné z WWW: <http://www.trumpfproducts.com/laser_marking_machines.html>.
22. *Deep Engraving* [online]. 2008 [cit. 2010-04-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.gsiglasers.com/MarketSectors.aspx?page=34>>.
23. *Reda* [online]. 2010 [cit. 2010-04-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.reda.cz/o-nas/soucasnost/>>.
24. *TAMPOPRINT* [online]. 2009 [cit. 2010-04-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.tampoprintusa.com/Cliche-Plates.html>>.
25. LEONE, C.; LOPRESTO, V.; DE IORIO, I. *Optics and Lasers in Engineering : Wood engraving by Q-switched diode-pumped frequency-doubled Nd:YAG green laser* [online]. 2008 [cit. 2010-04-02]. Dostupné z WWW: <www.sciencedirect.com>.
26. *Operační manuál LASERfibre MediCom*. Praha: MediCom a.s., 2009. 125 s.
27. *Operační manuál pro laser ILS 3*. Praha : CEMark, s.r.o., 2008. 27 s.
28. LANG, Ota. *Něco o gravírování* [online]. 2009 [cit. 2010-05-17]. Gravírování jako součást "signmaking" industry. Dostupné z WWW: <http://gravotech.sk/navody_/zaklad.htm>.
29. *Hommel-Etamic.cz* [online]. 2005 [cit. 2010-05-02]. Plakát -Drsnost povrchu. Dostupné z WWW: <<http://www.hommel-etamic.cz/cz/pdf/HOMMEL%20CS%20plakat.pdf>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ν	[Hz]	Frekvence emitovaného kvanta světelného záření
ABS	[-]	Akrylonitrýl-butadien-styren
Al	[-]	Hliník
AOM	[-]	Akustickooptická modulace
ASCII	[-]	American Standard Code for Information Interchange = americký standardní kód pro výměnu informací
CO ₂	[-]	Oxid uhličitý
Cu	[-]	Měď
E	[J]	Energie laseru
E ₁	[J]	Nižší energetická hladina atomu
E ₂	[J]	Vyšší energetická hladina atomu
F	[Hz]	Pulzní frekvence
h	[J.s]	Planckova konstanta = $6,626 \cdot 10^{-34}$
He	[-]	Helium
HPGL	[-]	Hewlett Packard Graphics Language
L	[μm]	Šířka profilu povrchové vrstvy
l	[mm]	Základní délka profilu
LASER	[-]	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation = zesílení paprsků světla pomocí vynucené emise záření
LBM	[-]	Opracování laserovým paprskem
m	[-]	Střední čára profilu
N ₂	[-]	Dusík
Nd	[-]	Neodym
Nd-YAG	[-]	Yttrioaluminiový granát s ionty Nd ³⁺
Ne	[-]	Neon
O ₂	[-]	Kyslík
P	[W]	Výkon laseru
PC	[-]	Personal Computer = osobní počítač
P _m	[W]	Střední výkon laseru
P _p	[W]	Pulzní výkon laseru
PVC	[-]	Polyvinylchlorid
q	[W/m ²]	Hustota energie toku laseru
R	[-]	Počet opakování
Ra	[μm]	Střední aritmetická úchylka profilu
Rz	[μm]	Maximální výška profilu
S	[mm/s]	Skenovací rychlost
SE	[-]	Sekundární elektrony
st	[μm]	Vzdálenost mezi lineárními kroky

TEM	[-]	Transverse elektromagnetic mode = módobá struktura
UPC	[-]	Univerzální kód produktu
x, y, z	[-]	Souřadnice v prostoru
Y	[-]	Yttrium
y_i	[μm]	Hodnota úchylky i-tého bodu profilu od střední čáry profilu I
R_p	[μm]	Výška nejvyššího výstupku
R_v	[μm]	Hloubka nejnižší rýhy
l_r	[mm]	Základní délka
λ	[μm]	Vlnová délka

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Technické parametry vláknového laseru. *Operační manuál LASERfibre MediCom*. Praha: MediCom a.s., 2009. 125 s.
- Příloha 2 Tabulka typických materiálů a parametrů pro LASER. *Operační manuál LASERfibre MediCom*. Praha: MediCom a.s., 2009. 125 s.
- Příloha 3 Vyhodnocení drsnosti povrchu vzorku č. 1.
- Příloha 4 Technické parametry laseru ALS 04. ASYS *Automatisierungssysteme* [online]. 2009 [cit. 2010-04-21]. Marking systems. Dostupné z WWW: <<http://www.asys.de/asys-gmbh/>>.

