

4 POSTUP VÝROBY LOGA LASEROVÝM OBRÁBANÍM

Úvod

Laserové žiarenie je elektromagnetické žiarenie, vznikajúce na princípe stimulovanej emisie fotónov v aktívnom prostredí, na základe vonkajšieho podnetu. Teoretické základy vynútenej emisie žiarenia podal A. Einstein už v roku 1917, prvé funkčné laserové systémy sa však objavili až v roku 1960, keď prvý rubínový laser zostrojil americký fyzik Teodor Maiman. Neskôr laserové technológie našli uplatnenie v širokom spektre oblastí. Patria sem biológia a medicína (chirurgia, stomatológia, fyzioterapia), energetika, vojenský priemysel (laserový sledovač, laserová pištoľ, laserom navádzané strely) veda a výskum (spektroskopia, atómová fyzika, jadrová fúzia, metrológia), priemysel, stavebníctvo, optická komunikácia, optické spracovanie a zaznamenávanie údajov, litografia a stereolitografia. Používajú sa v geodézii na meranie veľkých vzdialeností s extrémnou presnosťou, v geofyzike, pri skúmaní deformácie a pohybe kontinentov, pri štúdiu gravitačného poľa Zeme, ale aj na skúmanie oceánov a ľadovcov a na štúdium relativistických efektov v teoretickej fyzike (Hu a kol., 2019).

4.1 Laserový zväzok

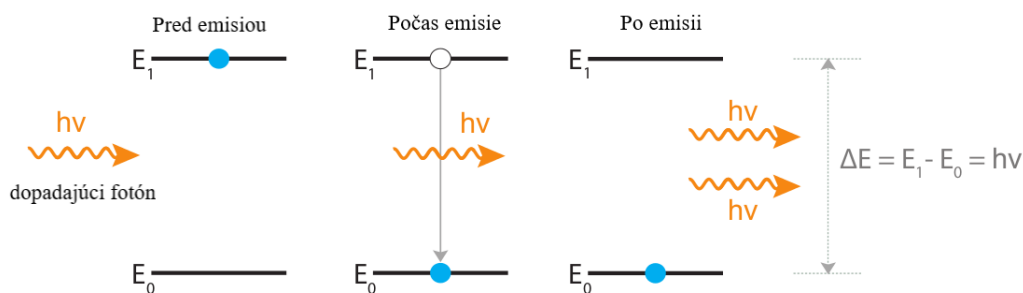
Laser (z angl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je kvantovo-elektronický zosilňovač elektromagnetického žiarenia v oblasti viditeľného svetelného spektra a príblych vlnových dĺžok. Laserový zväzok predstavuje zväzok usmernených častíc svetla, fotónov a má charakteristické vlastnosti, ktorými sa odlišuje od iných druhov žiarenia. Je monochromatický, koherentný, fokusovateľný a má nízku divergenciu (Mičietová a kol., 2007).

Laserový zväzok je tvorený fotónmi, ktoré sú emitované elektrónmi pri zmene energetickej hladiny, ku ktorej dochádza pri zrážke tzv. budiacej častice (budiacho fotónu) s elektrónom. Elektrón vtedy pohltí energiu fotónu a dôjde k jeho presunu (excitácii) na vyššiu energetickú hladinu (Obr. 1), kde zotrúva veľmi krátky čas (rádovo 10^{-8} s) a potom padá na nižšiu, tzv. metastabilnú hladinu. Tu zotrúva dostatočne dlho (až 100 000 x dlhšie v porovnaní s hladinou, na ktorú bol pôvodne exitovaný. Nasleduje populačná inverzia, ku ktorej dochádza vtedy, ak je viac elektrónov atómu na metastabilnej hladine ako na základnej hladine. Po prúde stimulujúceho fotónu dochádza k presunu elektrónov na základnú hladinu a všetky emitujú jeden fotón. Všetky tieto fotóny, vrátane toho stimulujúceho sa spoja v jednu vlnu s oveľa väčšou amplitúdou. Nakoľko majú fotóny časticový aj vlnový charakter, pri skladaní dvoch vln vznikne jedna, ktorá má dvojnásobnú amplitúdu a teda dvojnásobnú energiu. Tým dôjde k zosilneniu svetla stimulovanou emisiou žiarenia.

Prechod elektrónu zo základnej energetickej hladiny E_0 na vyššiu energetickú hladinu E_1 sprevádza absorpcia a prechod z vyššej hladiny na základnú emisia, kde hodnotu energie možno matematicky vyjadriť vzťahom (4.1)

$$E = h \cdot \nu \quad (4.1)$$

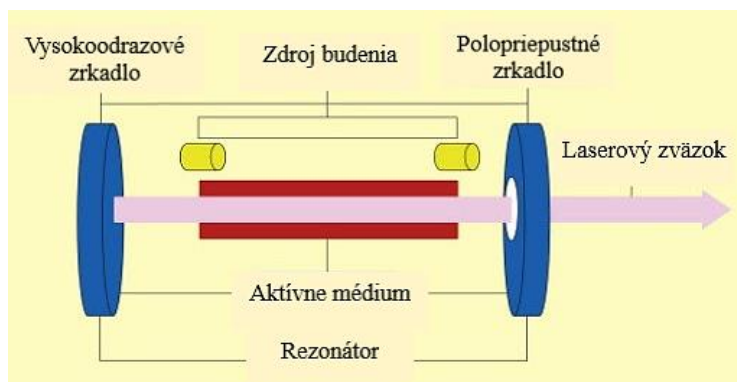
kde E je kvantová energia, ν – rezonančná frekvencia žiarenia, h – Planckova konštanta ($6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s) (Mičietová a kol., 2007).



Obr. 4.1. Schéma procesu stimulovanej emisie.

Atóm v excitovanom stave je stimulovaný k emitovaniu fotónu dopadajúcim fotónom. Stimulovaný emitovaný fotón má rovnakú fázu, frekvenciu a polarizáciu ako dopadajúci fotón (Scientific Volume Imaging)

K usmerneniu emitovaných fotónov dochádza v rezonátore. Rezonátor je sústava dvoch zrkadiel, kde jedno je vysokoodrazové, s odrazivosťou až 99,9 % a druhé zrkadlo je polopriepustné. Zrkadlá sú umiestnené rovnobežne (Obr. 4.2) (Csele, 2004; Mičietová a kol., 2007, Mičietová, 2001).



Obr. 4.2. Základné časti lasera (Opticlabs)

4.2 Obrábanie laserovým zväzkom

Laserové technológie majú v priemysle široké uplatnenie, využívajú sa na laserové obrábanie (laserové rezanie, frézovanie, sústruženie, vŕtanie), laserové mikroobrábanie (gravírovanie, textúrovanie), laserové zváranie, spekanie práškových materiálov, povlakovanie, leštenie a čistenie materiálov (Hu a kol., 2019). Môžu sa používať aj na podporu konvenčných obrábacích metód – laserom podporované obrábanie (LAM), ktoré má uplatnenie pri obrábaní ťažkoobrábateľných materiálov. Laser v súčasnosti má významné postavenie v oblasti aditívnych spôsobov výroby (Hu a kol., 2019).

Laserové obrábanie je progresívnou technológiou založenou na premene svetelnej energie na energiu tepelnú, ktorá spôsobuje intenzívny lokálny ohrev obrábaného materiálu (10^4 °C). Princípom je termálny mechanizmus úberu materiálu. Kinetická energia fotónov sa pri dopade na povrch materiálu mení na tepelnú a dochádza k zahrievaniu, taveniu, odparovaniu a ablácii materiálu (Kibria a kol., 2017).

V závislosti od dĺžky trvania pulzu laserového zväzku sa proces fyzikálneho odstraňovania materiálu mení. Pri pulzoch dlhších ako 1 ns vzniká relatívne veľká teplom ovplyvnená oblasť a môže dôjsť k vzniku prasklín na povrchu alebo vo vnútri materiálu. Vplyvom ultrakrátkych intervalov trvania pulzov a ultravysokej intenzity žiarenia sa nelineárna absorpcia indukuje len v úzko ohraničenej oblasti spracovávaného materiálu. Použitie laserov s ultrakrátkou pulzáciou umožňuje tzv. studenú abláciu, kde sa materiál priamo odparuje, bez prechodu fázou roztavenej kvapaliny. (Renk, 2017; Sugioka et al., 2010).

Zdroje laserového žiarenia, používané v procesoch obrábania, sa delia z viacerých hľadísk, najčastejšie podľa typu aktívneho média (pevnotátkové, plynne, polovodičové, kvapalné a chemické lasery), pracovného režimu (kontinuálne a pulzné) a dĺžky trvania pulzu (nanosekundové, pikosekundové, femtosekundové a attosekundové).

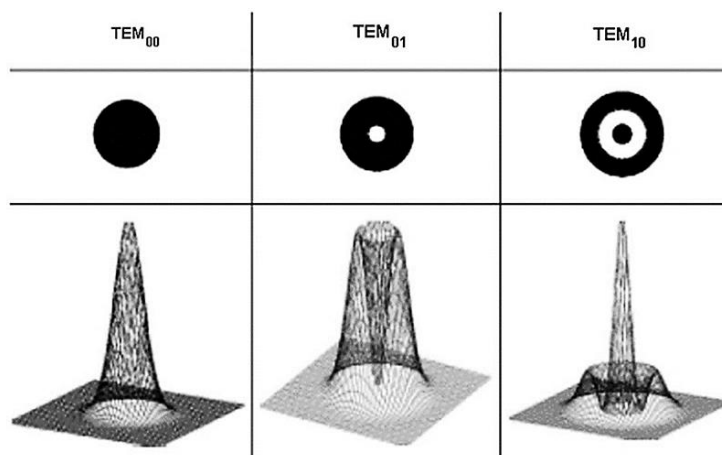
4.3 Parametre laserového obrábania

Neoddeliteľnou súčasťou laserového obrábania sú parametre, ktoré do procesu obrábania vstupujú, pričom výsledok obrábania môžu výrazne ovplyvňovať. Vplyv týchto vstupných parametrov na materiál, časovú a finančnú efektivitu, tvarovú a rozmerovú presnosť, viedli k podrobnému skúmaniu ich vplyvu počas celého procesu obrábania v rôznych podmienkach. Medzi vstupné parametre, na ktoré treba brať ohľad, patria vlastnosti obrábaného materiálu a parametre laserového zariadenia.

Vlastnosti obrábaného materiálu sú dané predovšetkým jeho termofyzikálnymi vlastnosťami (tepelná vodivosť, viskozita taveniny, povrchové napätie, absorpcia, reflexia) a geometriou obrobku.

Vlastnosti laserového zväzku je možné charakterizovať týmito parametrami:

- **Rozbiehavosť (divergencia)** – miera rozptylu laserového zväzku. Kvalitu zväzku charakterizuje veľkosť divergencie resp. difrakčný faktor M^2 .
- **TEM mód** (Transverse Electromagnetic Mode) – tvar priečného rezu laserového zväzku v rezonátore vplyvom magnetického poľa. Vyjadruje kvalitu laserového zväzku z pohľadu rozdelenia energie v priereze laserového zväzku (Obr. 4.3).



Obr. 4.3. Rôzne rozdelenie energie v priereze laserového zväzku (De Moraes a kol., 2017)

- **Vlnová dĺžka** (wavelength λ) – vyjadruje geometrickú vzdialenosť medzi maximami dvoch po sebe nasledujúcich svetelných vln. Jej jednotkou je meter (m). Vlnová dĺžka je určená vzťahom (4.2):

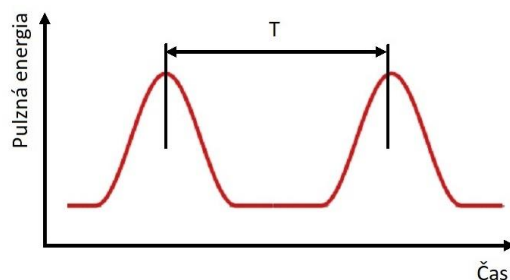
$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4.2)$$

kde v je rýchlosť svetelnej vlny (m.s^{-1}), f – frekvencia (Hz).

- **Frekvencia** (frequency f) – je fyzikálna veličina, ktorá udáva periodický dej kmitania zodpovedajúcej elektromagnetickej vlny. Udáva počet opakovaní vyžiarovania laserového zväzku za určitý čas (Obr. 4.4). Jej jednotkou je Hertz (Hz). Frekvencia je definovaná ako obrátená hodnota periódy, vzťahom (4.3):

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.3)$$

kde T vyjadruje periódu v sekundách (s).



Obr. 4.4. Grafické znázornenie periódy T

- **Pulzná energia** (pulse energy P_e) – energia pulzov vyjadrená v Jouloch (J), daná vzťahom (4.4):

$$P_e = \frac{P_A}{f} \quad (4.4)$$

kde P_A je priemerný vyžiarovaný výkon (W), f – frekvencia (Hz).

- **Hustota energie** (energy density Φ) – množstvo vyžiarenej energie pripadajúcej na jednotku plochy. Jednotkou je J.cm^{-2} . Je udávaná celkovou energiou všetkých fotónov vyžiarených za určitý čas dopadajúcou na jednotku povrchu S podľa vzťahu (4.5):

$$\Phi = \frac{P_e}{S} \quad (4.5)$$

kde P_e je pulzná energia (J), S – plocha, na ktorú žiarenie dopadá (m^2).

- **Špičkový výkon** (peak power P_{PEAK}) – táto veličina znamená maximálny optický výkon a predstavuje prácu vykonanú za jednotku času. Jednotkou je Watt (W). Špičkový výkon lasera súvisí s energiou pulzov na výstupe a možno ho vyjadriť vzťahom (4.6):

$$P_{PEAK} = \frac{P_e}{\tau_p} \quad (4.6)$$

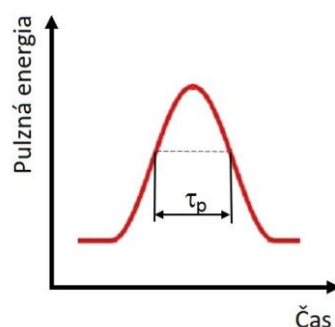
kde P_e je energia pulzu (J), τ_p – dĺžka trvania pulzu (s).

- **Hustota výkonu** (power density P_D) – analogická veličina k hustote energie, ktorá vyjadruje pôsobenie špičkového výkonu lasera P_{PEAK} na jednotku plochy kolmej na smer šírenia svetla. Jednotkou je $W.cm^{-2}$. Vypočíta sa podľa vzťahu (4.7):

$$P_D = \frac{P_{PEAK}}{S} \quad (4.7)$$

kde P_{PEAK} je špičkový vyžiarený výkon (W), S – plocha na ktorú žiarenie dopadá (m^2).

- **Dĺžka trvania pulzu** (pulse duration τ_p) – predstavuje šírku v polovici maxima amplitúdy (spojnica bodov A a B na Obr. 4.5).



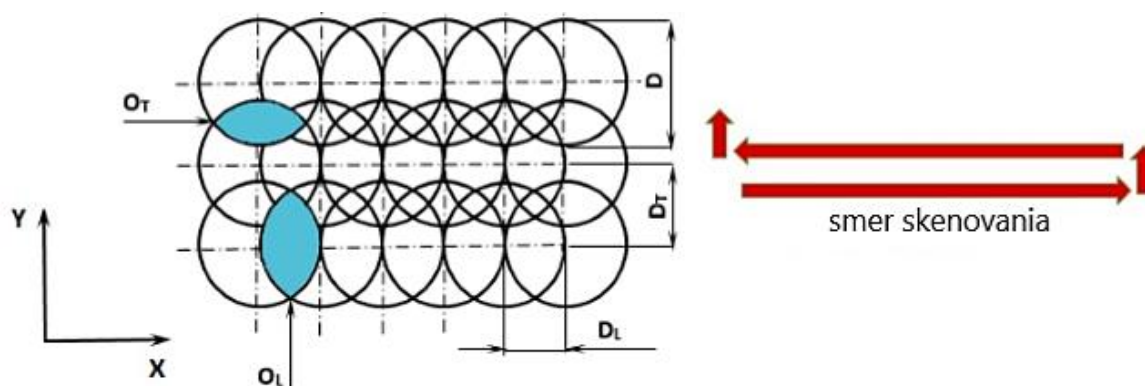
Obr. 4.5. Grafické znázornenie dĺžky trvania pulzu τ_p

- **Skenovacia rýchlosť** (scanning speed v_s) – rýchlosť, akou sa laserový zväzok pohybuje po povrchu obrobku, udáva sa v $mm.s^{-1}$.
- **Rozstup dráh laserového zväzku** (track distance D_L , D_T) – vzdialenosť stredov dvoch po sebe nasledujúcich pulzov laserového zväzku (Obr. 4.6). Tento parameter sa uvádza v mikrometroch (μm) a označuje sa D_T (transverzná vzdialenosť pulzov) a D_L (laterálna vzdialenosť pulzov). Vzdialenosť dráh v smere, v ktorom sa pohybuje laserový zväzok sa vypočíta vzťahom (4.8):

$$D = \frac{v_s}{f} \quad (4.8)$$

kde v_s je rýchlosť skenovania ($mm.s^{-1}$), f – frekvencia (Hz).

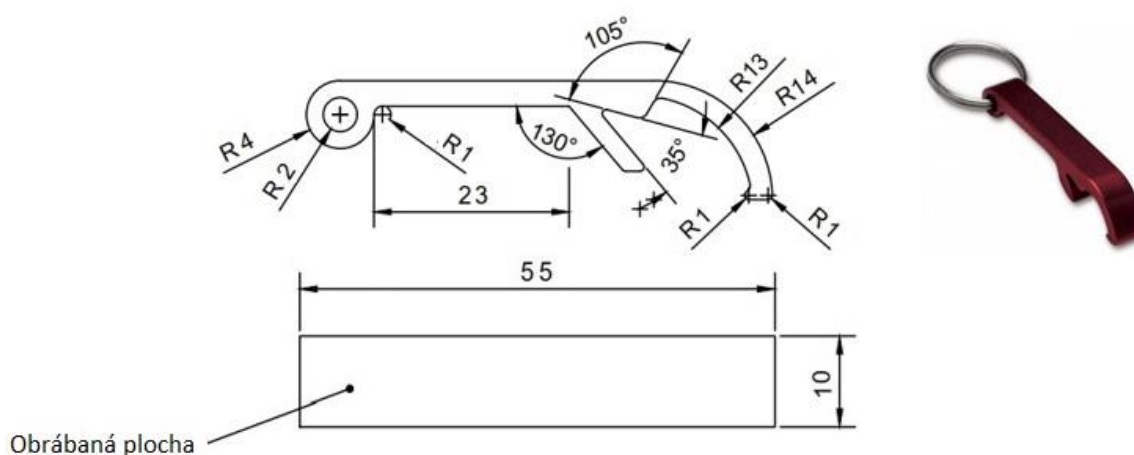
- **Pulzné prekrytie** (pulse overlap O_{V_x} ; O_{V_y} , resp. O_L ; O_T) – opisuje priestorové prekrytie medzi dvoma nasledujúcimi laserovými pulzami a je vyjadrené v percentách. Je to percentuálne vyjadrenie, koľko plochy sa z dvoch nasledujúcich pulzov prekrýva. Označuje sa O_{V_x} alebo O_{V_y} podľa toho, v ktorej osi dochádza k prekrytiu pulzov resp. O_L ak ide o laterálne prekrytie alebo O_T ak ide o transverzálne prekrytie. Schematicky je pulzné prekrytie znázornené na Obr. 4.6.



Obr. 4.6. Schematické zobrazenie vzdialenosti dráh laserového zväzku: D – priemer laserového zväzku; D_L – laterálna vzdialenosť pulzov; D_T – transverzálna vzdialenosť pulzov; O_L – laterálne pulzné prekrytie; O_T – transverzné pulzné prekrytie (Šugár a kol., 2019)

4.4 Laserové obrábanie – značenie

Postup prípravy výroby a vlastnej výroby súčiastky laserovým obrábaním bude predstavený na príklade laserového značenia nápisu a loga na povrchu kľúčenky vyrobenej z eloxovanej Al zliatiny. Tvar a rozmery súčiastky približuje Obr. 4.7.



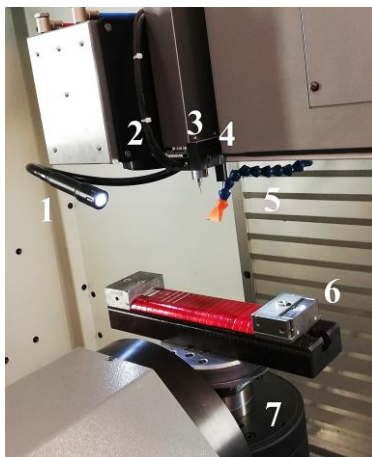
Obr. 4.7. Výkres súčiastky

Na značenie bude použité CNC laserové obrábacie centrum Lasertec 80 Shape (fa DMG Mori) (Obr. 4.8). Stroj je vybavený vláknovým yterbiové pulzným nanosekundovým laserom s maximálnym výstupným optickým výkonom 100 W pri použití pulznej frekvencie 100 kHz. Dĺžka trvania pulzu je 120 ns a priemer spotu laserového zväzku je 50 μm .



Obr. 4.8. Obrábacie centrum Lasertec 80 Shape

Hlavné časti CNC laserového obrábacieho centra, umiestnené v jeho pracovnom priestore, znázorňuje Obr. 4.9.

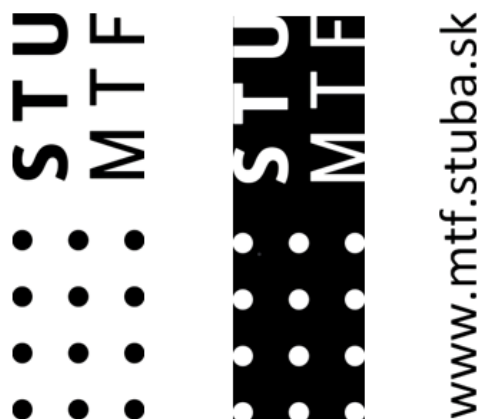


Obr. 4.9. Hlavné časti CNC laserového obrábacieho centra

1- osvetlenie, 2 – výstup skenera, 3 – dotyková sonda na meranie Z súradnice, 4 – kamera, 5 – chladenie, 6 – upínací systém EROWA, 7 – rotačný pracovný stôl

4.4.1 Grafický návrh

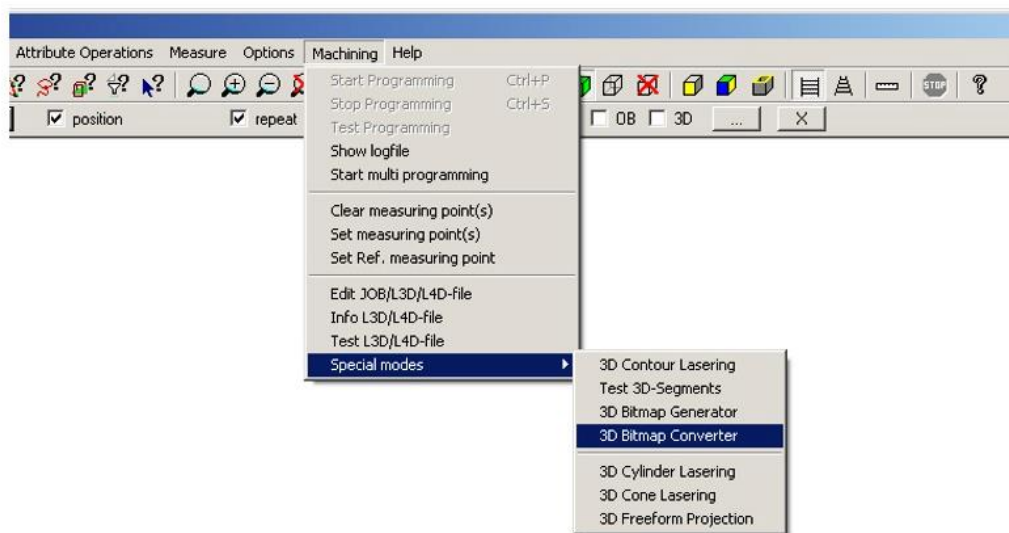
Keď je k dispozícii výkres súčiastky, a teda aj rozmery plochy, ktorá sa bude obrábať (značiť), je nutné pripraviť grafický návrh. Vyrábaný prvok môže byť ľubovoľný, napr. nápis, geometrický tvar alebo obrázok. Softvér, v ktorom sa spracováva grafický návrh nie je predpísaný, podmienkou je však to, aby bol vo formáte bitovej mapy (.bmp). Laserovým zväzkom bude odstraňovaný materiál v miestach, ktoré sú na bitovej mape zobrazené čiernou farbou. V danom prípade to bude logo Materiálovotechnologickej fakulty STU a adresa jej webovej stránky (Obr. 4.10). Umiestnenie loga na kľúčenke je zvolené s ohľadom na dobrú viditeľnosť a jednoduchosť výroby.



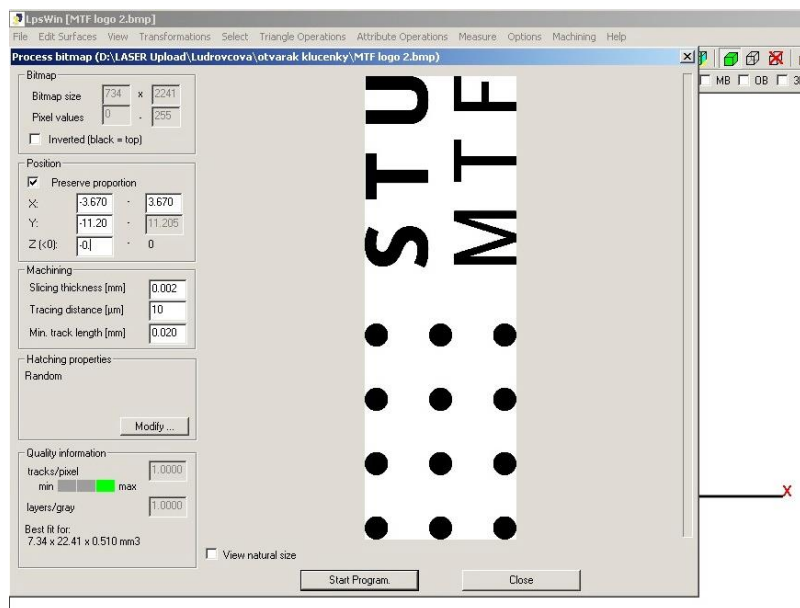
Obr. 4.10. Grafické návrhy vo formáte .bmp

4.4.2 Import grafického návrhu do softvéru LpsWin

Po vytvorení obrázka vo formáte .bmp je grafický návrh importovaný do softvéru LpsWin, kde sú generované dráhy laserového zväzku a nastavené sú tiež rozmery vyrábaného obrazca podľa veľkosti plochy, určenej na obrábanie. Bitovú mapu možno vložiť a konvertovať na dráhy laserového zväzku prostredníctvom funkcie „Special modes – 3D bitmap converter“, ktorá je súčasťou možnosti „Machining“, dostupnej v ponukovom menu na hornej lište v pracovnom prostredí softvéru LpsWin (Obr. 4.11). Na výstupe sa zobrazí okno s bitovou mapou a s funkciami, umožňujúcimi nastavenie dráh laserového zväzku (Obr. 4.12).



Obr. 4.11. Pracovné prostredie softvéru LpsWin s cestou ku konvertovaniu bitovej mapy

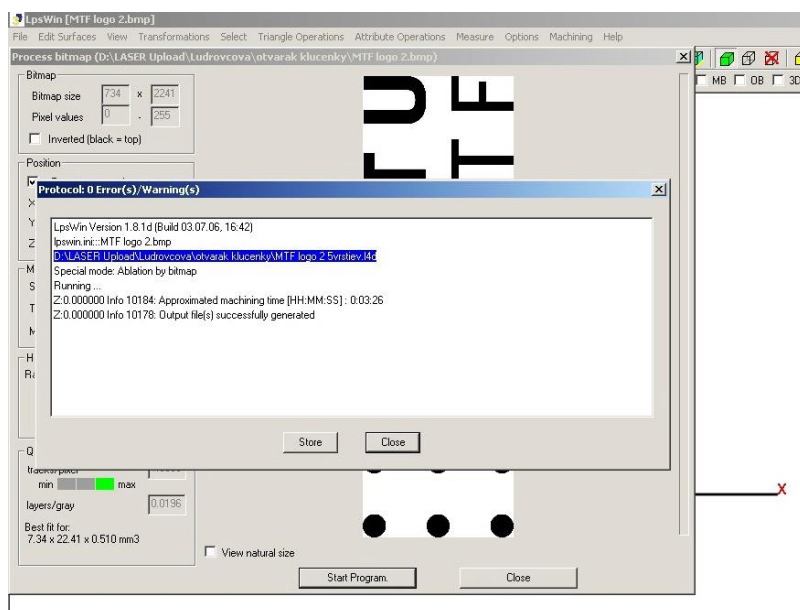


Obr. 4.12. Nastavenie dráh laserového zväzku v softvéri LpsWin

Následne v poli „Position“ (Obr. 4.12) sú zadávané rozmery vyrábaného obrazca X a Y s nulovým bodom programu (bod so súradnicami X0, Y0), ktorý bol pre tento prípad zvolený v strede zobrazenej plochy.

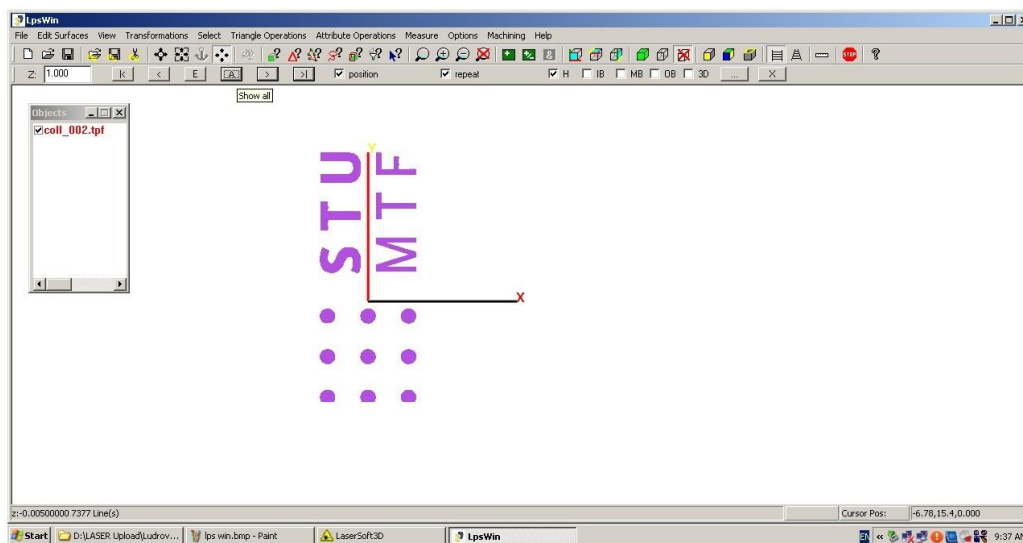
Súradnica Z určuje hĺbku zapustenia obrobenej plochy a závisí od nastavenej hrúbky jednej vrstvy (slicing thickness), ktorá je zvyčajne 1 alebo 2 µm. Pri zvolení hrúbky 2 µm s piatimi opakovaniami, bude výsledná hĺbka zapustenia vyrábanej plochy 0,01 mm.

Položka „Tracing distance“ znamená rozstup dráh laserového zväzku a v danom prípade bola nastavená hodnota 10 µm. Použitím voľby „Start Program“ sú vygenerované dráhy laserového zväzku podľa zadaných údajov (Obr. 4.13).



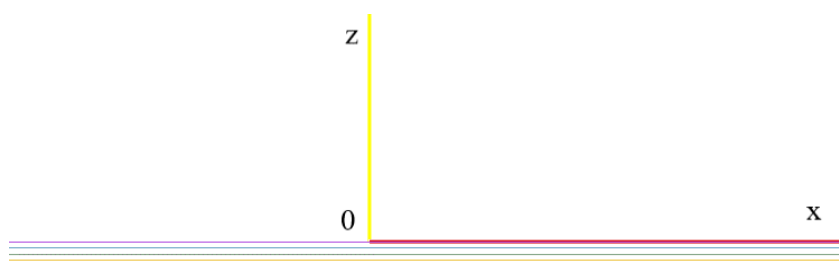
Obr. 4.13. Proces generovania dráh z bitovej mapy

Použitím možnosti „Machining – Test L3D/L4D file“ možno zobrazit' vygenerované dráhy pohybu laserového zväzku (Obr. 4.14).



Obr. 4.14. Vygenerované dráhy v softvéri LpsWin

Rovnako možno skontrolovať počet odoberaných vrstiev, farebne zobrazených na Obr. 4.15. Vygenerovaný grafický návrh je uložený vo formáte .l4d.



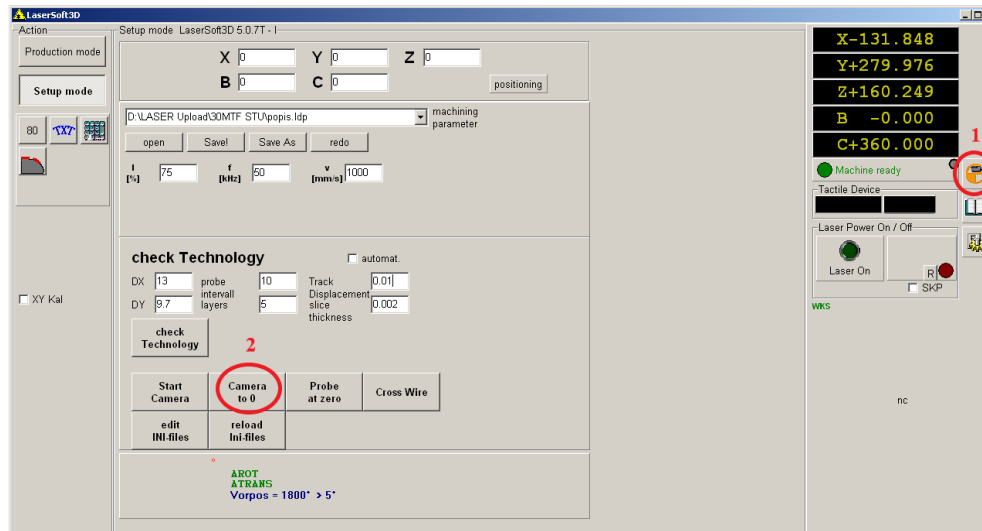
Obr. 4.15. Znázornenie počtu odoberaných vrstiev

4.4.3 Nastavenie nulového bodu obrobku a voľba parametrov procesu

Pred obrábaním sa obrobok upína na pracovný stôl obrábacieho centra použitím upínacieho systému EROWA tak, aby obrábaná plocha bola vo vodorovnej polohe (Obr. 4.9). Vzhľadom na väčšie množstvo vyrábaných kusov je efektívne upnúť viac obrobkov vedľa seba. Aby obrábané plochy boli ustavené v jednej rovine, na podloženie sa používajú kalibračné platničky.

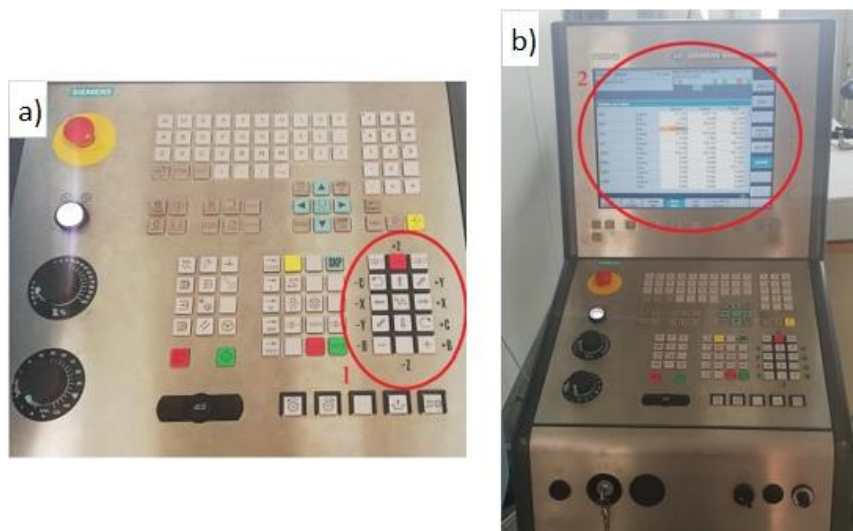
Po upnutí je aktivovaný softvér LaserSoft 3D, kde sa v režime nastavenia (Setup mode) pomocou kamery nastavuje nulový bod obrobku, použitím kamery, integrovanej v pracovnom priestore stroja, pracujúcej s 50-násobným zväčšením. Nulový bod obrobku predstavuje referenčný bod na povrchu obrábanej plochy, ktorý sa stotožní s nulovým bodom programu (v tomto prípade stred grafického obrazca – loga).

Pred spustením kamery je zobrazenie súradníc na monitore riadiaceho systému stroja prepnuté do režimu kamery (Obr. 4.16, poz. 1). Súradnice sa zobrazujú žltou farbou. Kliknutím na voľbu „Camera to zero“ (Obr. 4.16, poz. 2) sa spúšťa kamera s nulovým bodom, ktorý bol stroju zadán naposledy.



Obr. 4.16. Nastavovací režim softvéru LaserSoft 3D

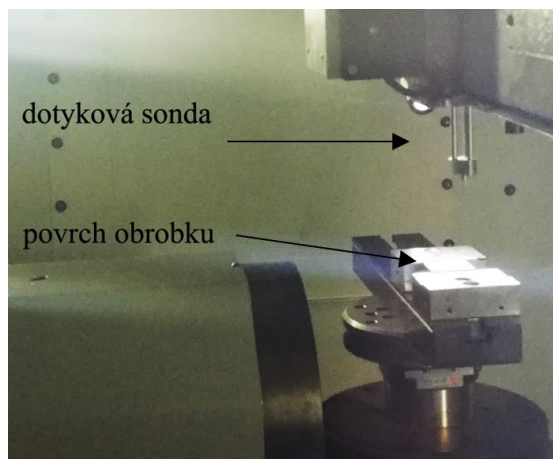
1 – prepnutie režimu súradníc, 2 – spustenie pohľadu kamery do nulového bodu



Obr. 4.17. Panel riadiaceho systému: a) detailný pohľad na klávesovú časť, b) celkový pohľad;
1 – tlačidlá na polohovanie pracovného stola, 2 – monitor so zobrazenými súradnicami

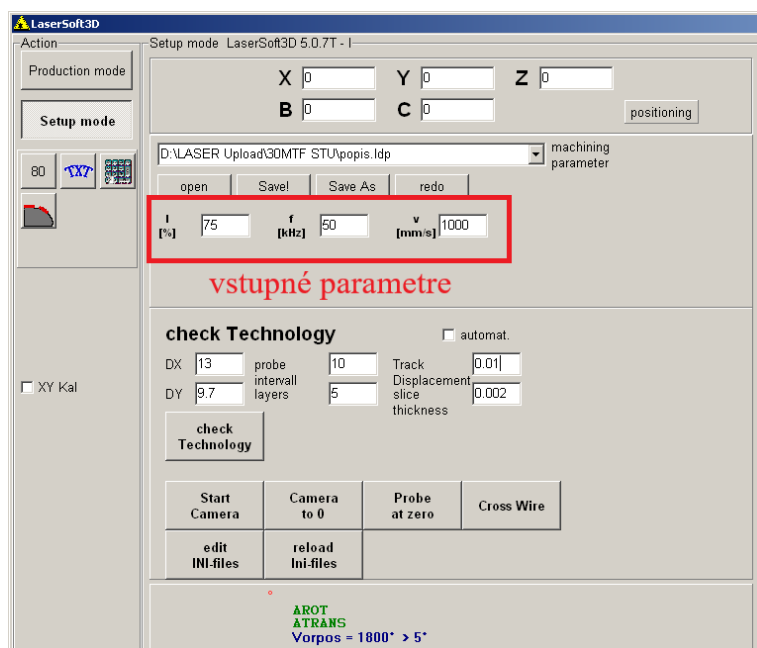
Manuálne, polohovacími tlačidlami na riadiacom paneli (Obr. 4.17, poz. 1), možno pohľad kamery presunúť na miesto na obrobku, zvolené ako nový nulový bod.

Aby sa zabezpečila fokusácia laserového zväzku na povrchu obrobku, je potrebné nastaviť nulovú pozíciu aj v smere osi Z, na čo slúži integrovaná dotyková sonda (Obr. 4.18).



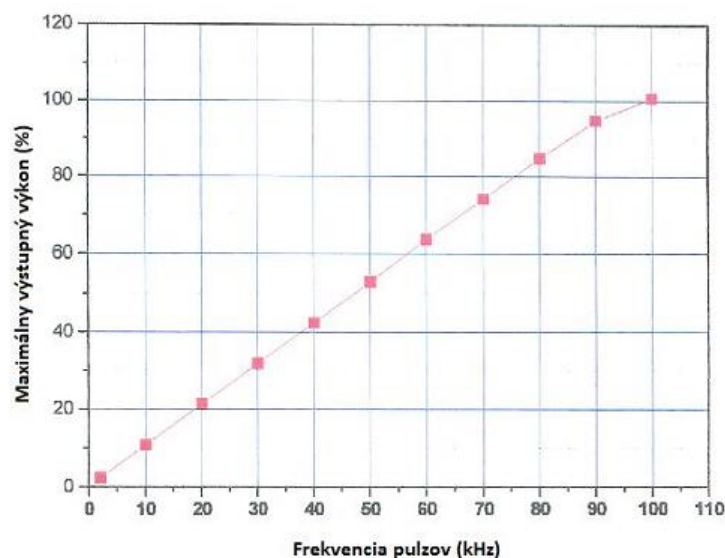
Obr. 4.18. Meranie súradnice z dotykovou sondou

Po nastavení nulového bodu je potrebné pristúpiť k definovaniu parametrov obrábania, ktoré sa nastavujú v režime „Setup mode“ softvéru LaserSoft 3D (Obr. 4.19). Parametre, ktoré sa ukladajú do súboru s príponou .ldp sú percentuálny podiel maximálneho výstupného optického výkonu lasera (I) v %, frekvencia (f) a rýchlosť skenovacieho pohybu laserového zväzku.



Obr. 4.19. Pole na zadávanie vstupných parametrov procesu obrábania

Výstupný optický výkon lasera sa mení v závislosti na pulznej frekvencii podľa grafu na Obr. 4.20.



Obr. 4.20. Závislosť výstupného optického výkonu lasera na pulznej frekvencii
(Manuál Sauer – DMG Mori, Lasertec 80 Shape)

Prehľad zvolených parametrov procesu laserového značenia približuje Tab. 4.1.

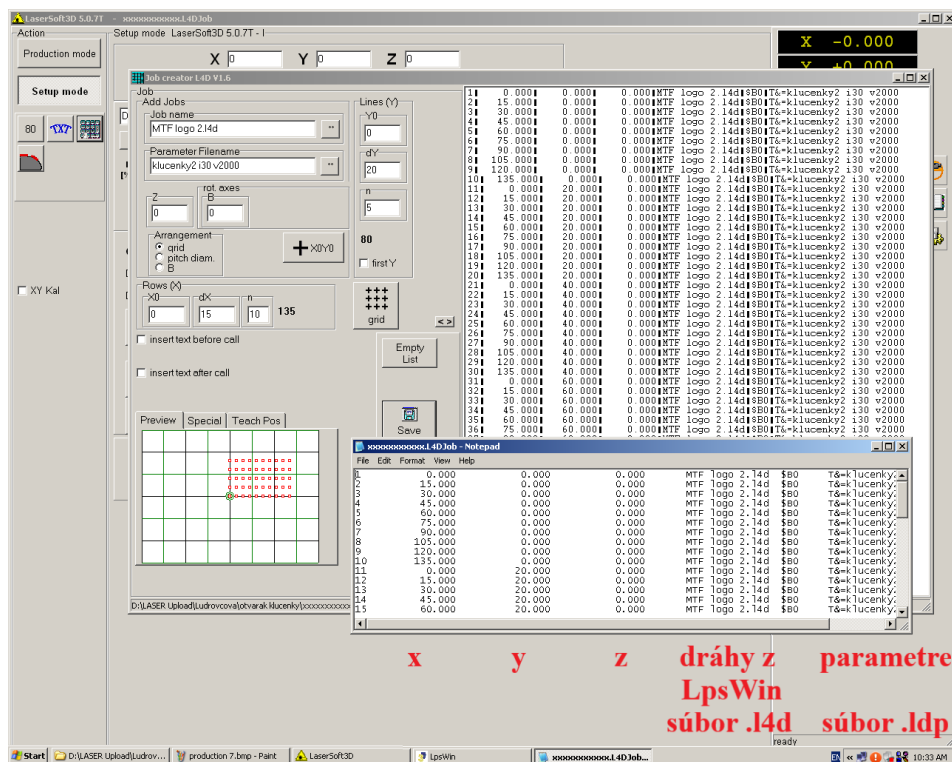
Tabuľka 4.1. Vstupné parametre laserového značenia

Parameter	Označenie	Hodnota	Jednotka
Výkon	I	37,5	W
Frekvencia	f	50	KHz
Rýchlosť skenovania	v_s	1 000	mm.s ⁻¹
Počet vrstiev	n	5	-
Laterálna vzdialenosť pulzov	D_L	10	μm
Laterálne pulzné prekrytie	O_L	80	%
Transverzná vzdialenosť pulzov	D_T	20	μm
Transverzné pulzné prekrytie	O_T	40	%

4.5 Generovanie riadiaceho programu a výroba súčiastky

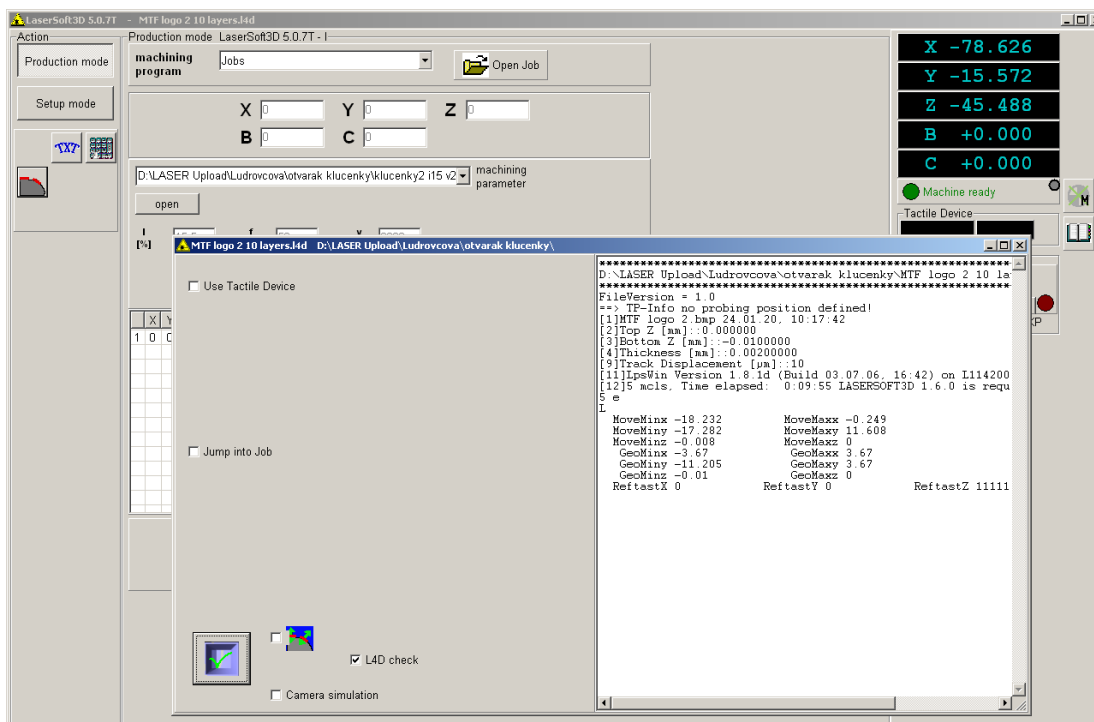
Po uložení vstupných parametrov procesu obrábania v prostredí LaserSoft 3D nasleduje vygenerovanie riadiaceho programu. V režime „JobCreator“ je potrebné otvoriť už vytvorené súbory – súbor s vygenerovanými dráhami (súbor vo formáte .l4d) a súbor s uloženými parametrami procesu (súbor vo formáte .ldp). Aby sa nulový bod obrobku nemusel manuálne pretavovať pre každú obrábanú plochu zvlášť, použije sa systém automatického posúvania nulového bodu (v prezentovanom príklade je to posunutie o hodnotu 10 mm).

Vytvorený riadiaci program, s príslušným počtom opakovaní a posunutí v jednotlivých osiach (Obr. 4.21), možno zobraziť tiež vo forme textového súboru s možnosťou dodatočnej editácie.



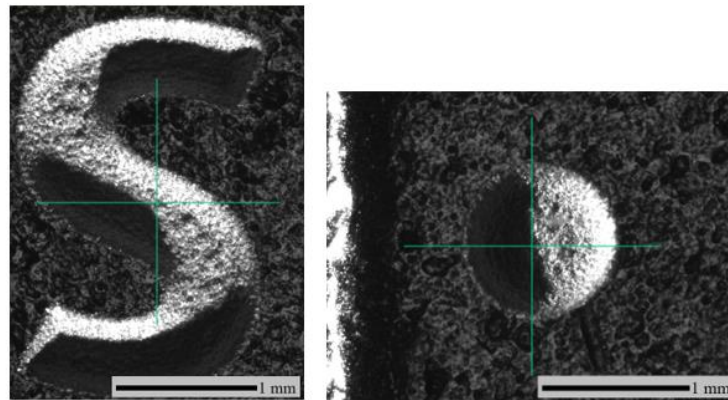
Obr. 4.21. JobCreator L4D s vygenerovaným programom riadiacim programom

Vygenerovaný riadiaci program sa po skontrolovaní spúšťa v režime „Production mode“ (Obr. 4.22).



Obr. 4.22. Spustenie procesu obrábania v prostredí JobCreator L4D

Výsledky procesu laserového značenia sú zobrazené na Obr. 4.23. Prvotnú vizuálnu kontrolu je možné rozšíriť o presnejšie kvalitatívne aj kvantitatívne zhodnotenie výsledku procesu obrábania, použitím integrovanej kamery (Obr. 4.24) a dotykovej meracej sondy.



Obr. 4.23. Pohľad kamery stroja na obrobené plochy



Obr. 4.24. Kľúčenky s logom a webom MTF STU, vyrobené laserovým značením

Záver

Prípadová štúdia priblížila postup technologickej prípravy výroby súčiastky laserovým obrábaním na príklade laserového značenia. Demonštrovaný bol komplex činností nevyhnutných na transformáciu grafického modelu obrábaných plôch do súboru, obsahujúceho informácie o dráhach laserového zväzku pri obrábaní, doplnený o postup vytvorenia súboru technologických informácií, určujúcich podmienky interakcie laserového zväzku s materiálom obrobku.

Predstavený postup výroby loga kľúčenky poslúži ako vhodný praktický príklad, rozširujúci teoretické poznatky o technológii laserového obrábania a jej aplikovateľnosti v súčasnej výrobnej praxi.

Zoznam bibliografických odkazov

- CSELE, M. 2004.** *Fundamentals of Light Sources and Lasers*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2004. p. 349. ISBN 9780471675211.
- DE MORAES, A. D. a CZEKANSKI, A. 2017.** Thermal Modeling of 304L Stainless Steel for Selective Laser Melting: Laser Power Input Evaluation. *Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2017*.
- HU, G. et al. 2019.** Tailoring metallic surface properties induced by laser surface processing for industrial applications. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2(2019), 29-34. ISSN 2589-5540.
- KIBRIA, G., BHATTACHARYYA, B. et. al. 2017.** *Non-traditional Micromachining Processes: Fundamentals and Applications*. Springer International Publishing AG, 2017, p. 431. ISBN 9783319520094.
- MAHAMOOD, R. M. 2018.** *Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials*. Springer Nature, 2018. p. 225. ISBN 9783319649849.
- MIČIETOVÁ, A., MAŇKOVÁ, I. a VELÍŠEK, K. 2007.** *Top trendy v obrábani V. časť Fyzikálne technológie obrábania*. MEDIA/ST, 2007. p. 232. ISBN 8096895472.
- MIČIETOVÁ, A. 2001.** *Nekonvenčné metódy obrábania*. Žilinská univerzita v Žiline/EDIS vyd. ŽU, 2001. p. 376. ISBN 8071008532.
- OPTICLABS** *Laser Principle* [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné na internete: <http://www.opticlabs.ca/laser-principle/>.
- PASCHOTTA, R.** *Optical frequency* [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné na internete: https://www.rp-photonics.com/optical_frequency.html.
- PASCHOTTA, R.** *Peak power* [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné na internete: https://www.rp-photonics.com/peak_power.html.
- RENK, F. K. 2017.** *Basics of Laser Physics*. Springer International Publishing AG, 2017. 2. vyd. p. 677. ISBN 9783319506517.
- Scientific Volume Imaging.** *Stimulated Emission* [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné na internete: <https://svi.nl/StimulatedEmission>.
- SUGIOKA, K., MEUNIER, M. a PIQUÉ, A. 2010.** *Laser Precision Microfabrication*. Berlin: Springer, 2010. p. 353. ISBN 9783642105227.
- ŠUGÁR, P., KOVÁČIK, J., ŠUGÁROVÁ, J. a LUDROVCOVÁ, B. 2019.** A Study of Laser Micromachining of PM Processed Ti Compact of Dental Implants Applications. *Materials*, 12(14). ISSN 1996-1944. Dostupné na internete: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/14/2246/htm>.