

## OPTODINAMSKA ANALIZA PULZNIH LASERSKIH OBDELOVALNIH PROCESOV Z Nd:YAG-LASERJEM

### OPTODYNAMIC ANALYSIS OF PULSED-LASER PROCESSING WITH A Nd:YAG LASER

**Simon Strgar, Janez Možina**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 1001 Ljubljana, p.p. 394, Slovenija  
simon.strgar@uni-lj.si

*Prejem rokopisa - received: 2000-10-20; sprejem za objavo - accepted for publication: 2000-11-24*

V delu je obravnavano lasersko vrtnanje in označevanje kovin s pulznim Nd:YAG-laserjem. Na primeru laserskega vrtnanja aluminija so predstavljene značilnosti pulznih laserskih obdelovalnih procesov in možnosti njihove optodinamske analize. Optodinamska analiza izkorišča nastanek udarnih valov med laserskim obdelovalnim procesom, ki se širijo v obdelovanec in okoliški prostor. Za detekcijo lasersko induciranih udarnih valov v zraku in merjenje njihovih karakteristik smo uporabili lasersko odklonsko sondo. Med časom preleta udarnih valov in globino nastalih laserskih izvrtin je bila za pulzno lasersko vrtnanje aluminija ugotovljena linearna odvisnost. Za potrebe laserskega označevanja smo pulzni laserski obdelovalni sistem nadgradili s spominsko-procesnim komunikacijskim vmesnikom. Laboratorijski rezultati označevanja so pokazali, da se z nadgradnjo sistema izrazito razširijo možnosti laserskega označevanja.

Ključne besede: pulzni laserski obdelovalni procesi, optodinamika, laserska odklonska sonda

Laser drilling and laser marking of metals with a pulsed Nd:YAG laser are discussed. Some characteristics of pulsed-laser processing and the possibilities of process optodynamic analysis are presented for the laser-drilling of aluminium. The optodynamic analysis is based on the observation of generated shock waves, which propagate in the material as well as in the surrounding air during laser processing. For the detection of laser-induced shock waves in the air and for measurements of their characteristics the laser-beam deflection probe was used. A linear relation between the shock waves' propagation time and the depth of the laser-drilled holes was found for pulsed-laser drilling of aluminium. For marking purposes, the pulsed-laser processing system was improved with a communication interface. The preliminary results of laser marking with the introduced advanced system show a significant improvement in the marking possibilities.

Keywords: pulsed-laser processing, optodynamics, laser-beam deflection probe

## 1 UVOD

Označevanje in vrtnanje z laserjem se kot aplikaciji pulznih laserskih obdelovalnih procesov v svetu hitro uveljavljata. Raznolikost materialov in spremenjene želje uporabnikov za lasersko označevanje zahtevajo uveljavitev različnih označevalnih tehnik in številnih industrijskih laserskih označevalnih sistemov<sup>1,2</sup>. Razvoj laserskega označevanja sledi usmeritvam k čim višji stopnji avtomatizacije, integracije in učinkovitosti proizvodnje<sup>3</sup>. Predvsem tehnika laserskega označevanja z odklonskimi zrcali postaja predmet vedno novih izboljšav<sup>4,5,6</sup>. Vendar pomanjkanje ustreznih informacij o obdelovalnem procesu ovira uveljavitev laserskih sistemov za označevanje in vrtnanje v sodobnih, računalniško krmiljenih proizvodnih sistemih s sposobnostjo izvajanja sprotne kontrole kvalitete obdelave.

Interakcija laserske svetlobe in snovi je namreč pojav, katerega kompleksnosti z analitičnimi modeli in numeričnimi simulacijami ni mogoče zadovoljivo opisati<sup>7,8,9</sup>. Absorpciji svetlobe in intenzivnemu segrevanju materiala sledita pri ablativnih laserskih obdelovalnih procesih taljenje in uparjanje, večkrat pa tudi nastanek plazme nad mestom obdelave. Lokalna in časovna koncentracija absorbirane energije povzroči nastanek

nezveznih tlačnih motenj, ki se širijo v material in okoliški medij z nadzvočno hitrostjo<sup>10</sup>. Takšne tlačne motnje imenujemo udarni valovi in jih predvsem v pulznih laserskih obdelovalnih procesih lahko koristno uporabimo kot vir informacij o obdelovalnem procesu.

Številne merilne metode, ki temeljijo na detekciji in analizi lasersko induciranih udarnih valov v materialu in okoliškem mediju, so bile razvite z namenom omogočiti sprotno spremljanje laserskih obdelovalnih procesov. Za detekcijo udarnih valov v zraku nad obdelovancem se je uveljavila laserska odklonska sonda<sup>11,12</sup>, ki je kmalu omogočila tudi opazovanje laserskih obdelovalnih procesov v realnem času<sup>13</sup>. Podobne možnosti ponuja pri detekciji udarnih valov v materialu tudi PZT-zaznavalo<sup>14</sup>. S sočasno detekcijo udarnih valov v materialu in zraku s PZT-zaznavalom in mikrofonom pa so bile preverjene možnosti optodinamske analize pulznega laserskega vrtnanja<sup>15</sup>.

V delu predstavljamo optodinamsko analizo, ki povezuje z lasersko odklonsko sondo izmerjene karakteristike udarnih valov v okoliškem zraku z geometrijskimi spremembami obdelovanca. S predloženo metodo želimo omogočiti opazovanje in adaptivno kontrolo pulznih laserskih obdelovalnih procesov v realnem času.



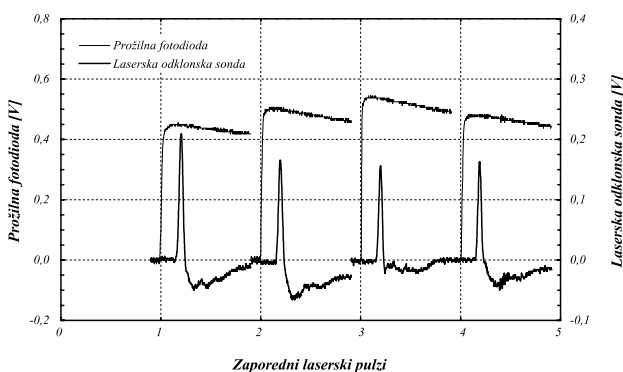
**Slika 1:** Shema eksperimenta  
**Figure 1:** Experimental set-up

## 2 EKSPERIMENTALNI DEL

Shema eksperimenta za optodinamsko analizo pulznega laserskega vrtnja aluminija je prikazana na **sliki 1**. Pulzni laserski obdelovalni sistem YAG 22 CLASSMARK, primarno namenjen označevanju, je bil uporabljen kot izvir laserske svetlobe z valovno dolžino  $1,064 \mu\text{m}$ . Pri frekvenci pulziranja  $1 \text{ kHz}$  je sistem oddajal laserske pulze dolžine  $150 \text{ ns}$  in energije  $4 \text{ mJ}$ , ki smo jih z lečo z goriščno razdaljo  $160 \text{ mm}$  fokusirali na obdelovanec. Izbrana optika je na površini obdelovanca laserski žarek zbrala v liso premera  $100 \mu\text{m}$ .

Vzorec, ki so ga sestavljali tesno zloženi,  $50 \mu\text{m}$  debeli aluminijevi lističi, smo osvetlili z zaporednimi laserskimi pulzi. Po končanem vrtnju smo stisnjene lističe vzorca ločili in globino nastalih izvrtin določili iz števila preluknjanih lističev. S tem smo določevanje pri vrtnju dosežene globine bistveno poenostavili.

Za detekcijo udarnih valov v zraku je bila uporabljena laserska odklonska sonda. Sondirni žarek iz He-Ne laserja moči  $0,5 \text{ mW}$  je bil pravokoten na os žarka iz obdelovalnega laserja, njegova oddaljenost od površine obdelovanca pa je bila  $1,5 \text{ mm}$ . Potovanje udarnega vala je v zraku povzročilo lokalne spremembe lomnega



**Slika 2:** Signala prožilne fotodiode in laserske odklonske sonde  
**Figure 2:** Triggering photodiode and laser-beam deflection probe signals

količnika, zato se je sondirni laserski žarek odklonil. Kot zaznavalo odklona sondirnega žarka smo uporabili fotodiodo QD 50-5T Centronic.

Na posameznem mestu smo za vrtnje uporabili do 500 zaporednih laserskih pulzov. Prožilna fotodioda je zaznala del odbite laserske svetlobe in z njenim signalom smo prožili osciloskop. Signale z laserske odklonske sonde smo ojačali z ojačevalnikom SR445 in jih digitalizirali z osciloskopom LT342. Signale smo prenesli v osebni računalnik in jih posamično analizirali. Opisanih razmer med eksperimenti nismo spreminjali.

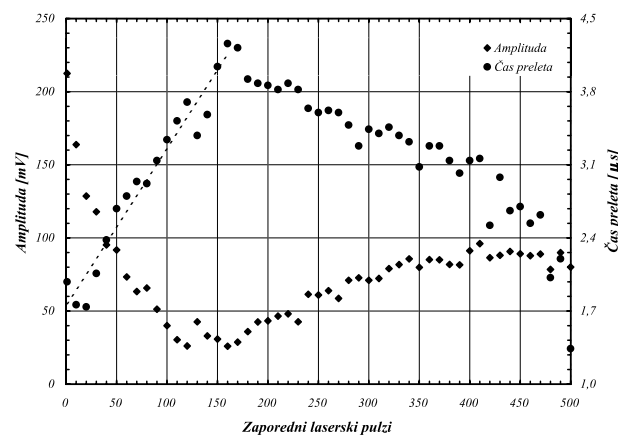
## 3 REZULTATI IN DISKUSIJA

### 3.1 Lasersko vrtnje

Značilna signala prožilne fotodiode in laserske odklonske sonde, ki ju dobimo med vrtnjem aluminijevega vzorca z zaporednimi laserskimi pulzi, sta prikazana na **sliki 2**. Optodinamski karakteristiki signala laserske odklonske sonde sta amplituda in čas preleta udarnega vala, ki je definiran kot časovni interval od nastanka udarnega vala do njegovega prihoda do sondirnega žarka.

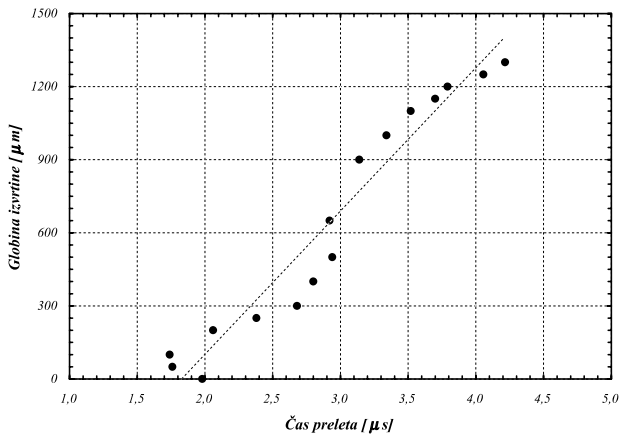
Amplitudo signala in čas preleta udarnega vala med pulznim laserskim vrtnjem aluminijevega vzorca prikazuje **slika 3**. V začetku procesa amplituda signala pada, medtem ko čas preleta udarnega vala narašča. Sledi območje naraščanja amplitude signala, v katerem se čas preleta udarnega vala zmanjšuje. Odvisnost časa preleta od števila zaporednih laserskih pulzov smo v območju naraščanja aproksimirali z linearno relacijo.

Analiza globine laserskih izvrtin je pokazala, da se stopnja odzemanja materiala med vrtnjem spreminja, zato je odvisnost globine izvrtin od števila laserskih pulzov nelinearna. Globina izvrtine z naraščanjem števila za vrtnje uporabljenih laserskih pulzov sprva narašča, kasneje pa postane prirast globine zanemarljiv.



**Slika 3:** Optodinamski karakteristiki signala laserske odklonske sonde med pulznim laserskim vrtnjem

**Figure 3:** Optodynamic characteristics of laser-beam deflection probe signal during pulsed-laser drilling



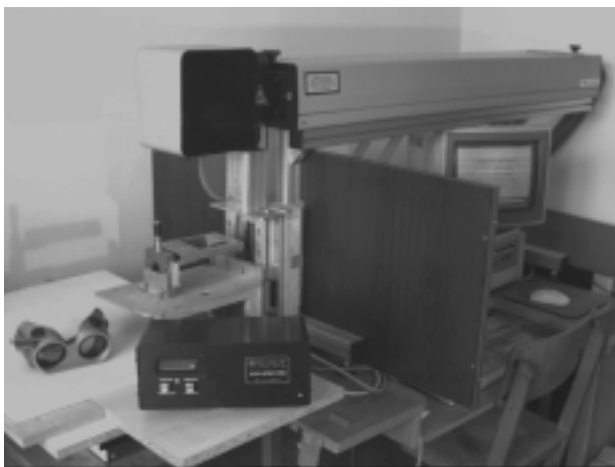
**Slika 4:** Globina laserske izvrtine v odvisnosti od časa preleta udarnega vala

**Figure 4:** Laser hole depth dependence on shock-wave flight time

Čase preleta udarnih valov smo povezali z globinami nastalih laserskih izvrtin. Odvisnost globine laserske izvrtine od časa preleta udarnega vala v območju odvzemanja materiala je prikazana na **sliki 4**. Z naraščanjem globine izvrtine narašča tudi čas preleta udarnega vala, njuno relacijo pa kljub spreminjanju stopnje odvzemanja materiala med procesom lahko aproksimiramo z linearno odvisnostjo. Ob upoštevanju navedene ugotovitve lahko sklenemo, da iz meritev časov preleta udarnih valov že med laserskim vrtnjem lahko določamo globino nastalih izvrtin.

### 3.2 Lasersko označevanje

Lasersko označevanje z Nd:YAG-laserjem in optičnim sistemom z odklonskimi zrcali je moderna tehnologija, primerna predvsem za označevanje kovinskih materialov. Za takšno označevanje smo razvili sistem s spominsko-procesnim komunikacijskim vmesnikom in s tem bistveno razširili uporabnost laserskega označevanja.



**Slika 5:** Pulzni laserski obdelovalni sistem YAG 22 CLASSMARK

Pulzni laserski obdelovalni sistem YAG 22 CLASSMARK smo delno predstavili že v eksperimentalnem delu prispevka. Ob Nd:YAG-laserskem izviru sta njegovi osnovni enoti optični sistem z odklonskimi zrcali in fokusirno lečo ter krmilnik, ki je zasnovan na uporabi osebnega računalnika. Pulzni laserski obdelovalni sistem YAG 22 CLASSMARK je prikazan na **sliki 5**.

**Slika 6** prikazuje spominsko-procesni komunikacijski vmesnik LOS-SPKV2MB. Vmesnik je bil razvit kot samostojna komunikacijska enota, ki naj bi sistem YAG 22 CLASSMARK prilagodila potrebam laserskega označevanja. Zasnovan in izdelan je tako, da ob uporabi pripadajoče programske opreme omogoča optimalno izkoriščenost možnosti, ki jih za lasersko označevanje ponuja uporabljeni obdelovalni sistem. Vključitev vmesnika v sistem YAG 22 CLASSMARK zagotavlja enakomeren izpis podatkov o označbi v gonilnik dveh galvomotorjev, na osi katerih sta pritrjeni odklonski zrcali. S tem je zagotovljen tudi nastanek enakomernejše laserske sledi v obdelovancu.

Vmesnik je v vsakem trenutku sposoben komunikacije z osebnim računalnikom, preko gonilnika pa lahko samostojno krmili proces laserskega označevanja. Tako lahko v primeru večkratne izdelave enake označbe osebni računalnik razbremenimo komunikacije z gonilnikom in omogočimo njegovo uporabo v druge namene tudi med procesom označevanja. Ker vmesnik zagotavlja ponovljiv izpis podatkov o označbi v gonilnik, s tem pa reprodukcijo enakih označb v poljubnem številu, ustreza njegova vključitev v sistem YAG 22 CLASSMARK tudi pogojem serijskega označevanja v industriji.

Rezultati laboratorijskega laserskega označevanja s predstavljenim sistemom so pokazali, da se značilnosti laserskega označevanja ob uporabi komunikacijskega vmesnika izrazito izboljšajo. Sistem namreč omogoča tudi kvalitetno reprodukcijo črno belih fotografij na površini nerjaveče pločevine.



**Slika 6:** Spominsko-procesni komunikacijski vmesnik

**Figure 6:** Communication interface

#### 4 SKLEPI

V prispevku sta predstavljeni tehnologiji laserskega vrtnja in označevanja kovin s pulznim Nd:YAG-laserjem. Študij interakcije laserske svetlobe in snovi z optodinamsko analizo pulznega laserskega vrtnja, ki ga izvajamo v okviru temeljne raziskovalne dejavnosti, smo dopolnili z aplikativnimi raziskavami na področju laserskega označevanja.

Predstavljeni rezultati analize pulznega laserskega vrtnja listastega aluminijevega vzorca kažejo, da predložena optodinamska metoda omogoča določitev globine izvrtin že med procesom laserskega vrtnja. Njeno splošno veljavnost bo treba preveriti z dodatnimi eksperimenti, s katerimi bomo potrdili neodvisnost metode od oblike in materiala vzorca.

Uporabnost pulznega laserskega obdelovalnega sistema za lasersko označevanje smo bistveno razširili z nadgradnjo sistema s spominsko-procesnim komunikacijskim vmesnikom. Mislimo, da predstavljene rezultate aplikativnih raziskav lahko ponudimo uporabnikom tehnologije laserskega označevanja v slovenski industriji, domačemu proizvajalcu laserskih izvirov pa kot podporo v razvojnih projektih.

#### 5 LITERATURA

- <sup>1</sup> T. McKee, How lasers mark, *Elektro Technology*, (1996) April/May, 27-31
- <sup>2</sup> O. Hayes, Marking applications now encompass many materials, *Laser Focus World*, (1997) Februar, 153-160

- <sup>3</sup> A. Knight, Laser marking looks to machine vision, *Laser Focus World*, (1996) July, 117-122
- <sup>4</sup> G. Bootsman, A. Oosterwijk, Laser beam moving system, e.g. laser marking system, *Patent No. WO9847035*, (1998)
- <sup>5</sup> Y. Baba, S. Togari, Laser marking system and method using controlled pulse width of Q-switch, *Patent No. US5719372*, (1998)
- <sup>6</sup> F. Y. Xu, Two-dimensional bar code laser marking method, *Patent No. EP0927947*, (1999)
- <sup>7</sup> A. Luft, U. Franz, A. Emsermann, J. Kaspar, A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling, *Applied Physics A*, 63 (1996), 93-101
- <sup>8</sup> P. Solana, P. Kapadia, J. M. Dowden, P. J. Marsden, An analytical model for the laser drilling of metals with absorption within the vapour, *Journal of Physics D, Applied Physics*, 32 (1999), 942-952
- <sup>9</sup> S. Tosto, Modeling and computer simulation of pulsed-laser-induced ablation, *Applied Physics A*, 68 (1999), 439-446
- <sup>10</sup> J. Diaci, J. Možina, A study of blast waveforms detected simultaneously by a microphone and a laser probe during laser ablation, *Applied Physics A*, 55 (1992), 352-358
- <sup>11</sup> J. A. Sell, D. M. Heffelfinger, P. L. Ventzek, R. M. Gilgenbach, Laser beam deflection as a probe of laser ablation of materials, *Applied Physics Letters*, 55 (1989), 2435-2437
- <sup>12</sup> R. Pini, R. Salimbeni, M. Vannini, G. Toci, Probe-beam deflection diagnostics of shock waves generated during laser drilling, *Applied Physics B*, 61 (1995), 505-510
- <sup>13</sup> C. Stauter, J. Fontaine, T. Engel, Real-time determination of the amount of removed material during short pulses laser micromachining, *Applied Surface Science*, 96-98 (1996), 522-527
- <sup>14</sup> T. Efthimiopoulos, E. Kritsotakis, H. Kiagias, C. Savvakis, Y. Bertachas, Laser ablation rate of materials using the generated acoustic waves, *Journal of Physics D, Applied Physics*, 31 (1998), 2648-2652
- <sup>15</sup> L. Grad, J. Možina, Optodynamic monitoring of excimer laser drilling of different ceramics, *Lasers in Engineering*, 4 (1995), 255-262