

OPTODINAMSKO SPREMLJANJE PROCESA ODSTRANJEVANJA BARVE V REALNEM ČASU

REAL-TIME OPTODYNAMIC MONITORING OF A PULSED-LASER DECOATING RATE

Matija Milanič, Matija Jezeršek, Aleš Babnik, Janez Možina

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija
matija.milanic@fs.uni-lj.si

Prejem rokopisa – received: 2002-10-03; sprejem za objavo – accepted for publication: 2003-06-23

V postopku laserskega odstranjevanja sloja barve z aluminijaste podlage smo uporabili dva čistilna laserja: ekscimernega ter bliskovnega Nd:YAG. Z namenom podrobnega razumevanja medsebojnih vplivov med pojavi, ki nastajajo med procesom laserskega odstranjevanja, smo sočasno uporabljali tri optične merilnike. Optodinamske signale v aluminijasti podlagi smo merili z Michelsonovim interferometrom s kompenziranim krakom (ACMI), optodinamske signale v zraku tik nad obdelovalno površino pa z lasersko odklonsko sondo (LBP). Geometrijo ter s tem globino in volumen nastajajočih kraterjev smo merili z laserskim anamorfnim profilmerom (LAP). Na osnovi opravljenih meritev smo ugotovili, da je bliskovni Nd:YAG laser ustrežnejši v primerjavi z ekscimernim laserskim izvirom ter da obstaja linearna povezava med količino odstranjene snovi in integralom optodinamskega signala, izmerjenega tako z ACMI kot tudi z LBP.

Ključne besede: optodynamika, lasersko čiščenje, Michelsonov interferometer, laserska odklonska sonda

A laser-based paint-de-coating process was studied by using two different cleaning lasers: an excimer laser and a pulsed Nd:YAG laser. In order to understand in detail the interacting impacts, which act during the laser-based de-coating process, it was monitored simultaneously by three optical measures. The optodynamic signals in the aluminum substrate were measured by an arm-compensated Michelson interferometer (ACMI) and optodynamic signals in the surrounding air, above the treated surface, were measured using a laser-beam probe (LBP). The geometry of the growing crater was measured using a laser anamorph profilmer (LAP). The experimental results showed the better suitability of the Nd:YAG laser compared to the excimer laser. We also found a linear correlation between the quantity of ablated material and the integral of an optodynamic signal measured by the ACMI and the LBP.

Keywords: optodynamics, laser decoating, Michelson interferometer, laser-beam deflection probe

1 UVOD

Svetovne potrebe po odstranjevanju slojev barv ali oksidov z različnih tehničnih površin so ogromne. Vsako leto je treba očistiti več sto milijonov kvadratnih metrov površin ladij, letal, kipov, mostov in drugih vrst kovinskih in nekovinskih površin. Poleg konvencionalnih tehnik, kot so čiščenje z vodnim curkom (water jet), ultrazvokom, s peskanjem ipd., prihajajo čedalje bolj v ospredje tudi sodobne tehnike, kot sta plazemsko in lasersko čiščenje površin. Prednosti laserskega čiščenja so pred konvencionalnimi tehnikami predvsem v zmožnosti selektivnega odstranjevanja snovi, ki je posledica različne absorpcije snovi za posamezno vrsto laserske svetlobe, nadalje v zmožnosti natančnega lociranja mesta čiščenja ter še nadalje majhnega vpliva na okolje, saj niso potrebni nobeni kemični pripomočki ¹.

Ustrezen nadzor procesa je bistven pri zagotavljanju optimalne hitrosti in kakovosti laserskega (in tudi drugih vrst) odstranjevanja barve oziroma oksidov. Med parametri procesa sta najvplivnejša svetlobna intenziteta in energija, pri čemer se slednja izraža v obsevalnem času za primer kontinuiranega oziroma v številu bliskov v primeru bliskovnega laserja. V literaturi je moč zaslediti različne tehnike nadzora, ki jih glede na vrsto zaznaval delimo na svetlobne in zvočne ². Med svetlobne spadajo

videonadzor očiščene površine ter spektralni senzorji (odbojnostni in absorpcijski), ki zaznavajo kemično sestavo obsevanega materiala ter s tem prehod med zaželenim odstranjevanjem plasti barve oziroma oksida in nezaželenim odstranjevanjem – poškodbo osnovnega materiala. Z zvočnimi senzorji (mikrofoni, PZT pospeškomerji itd.) posredno merimo intenzivnost odstranjevanja plasti. Njihova prednost pred svetlobnimi senzorji je predvsem v enostavni uporabi, slabost pa težavna in nezanesljiva interpretacija merjenega akustičnega signala.

V tem članku predstavljamo nadzorovan sistem za lasersko odstranjevanje barve. Nadzor smo izvedli z uporabo dveh optičnih senzorjev, ki sočasno merita optodinamske pojave, vzbujene v okoliskem zraku ter v osnovnem materialu. Optodinamski pojavi v zraku se izražajo v obliki zvočnega signala in jih merimo z lasersko odklonsko sondo (LBP), v osnovnem materialu pa v obliki širjenja ultrazvočnih valov in jih merimo z Michelsonovim interferometrom s kompenziranim krakom (ACMI). Sočasno pa smo kot referenco merili obliko nastajajočega kraterja v plasti barve z uporabo laserskega anamorfnega profilmera (LAP). Namen opravljenih meritev je bil najti povezavo med značilnimi

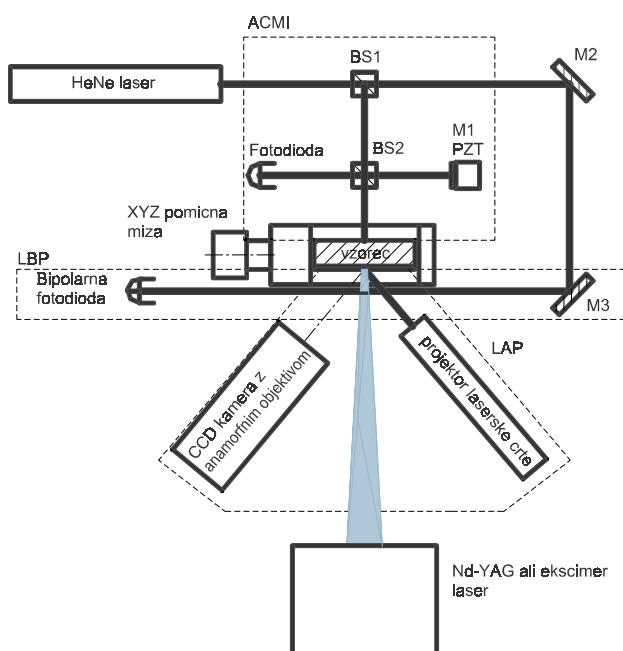
parametri optodinamskih signalov ter količino odstranjene snovi.

2 POSTAVITEV EKSPERIMENTA

Kot izvir laserske svetlobe za odstranjevanje barve smo uporabili bliskovni Nd:YAG-laser (valovna dolžina 1064 nm, dolžina bliska 6 ns, energija bliska 416 mJ) in ekscimerni XeCl-bliskovni laser (valovna dolžina 308 nm, dolžina bliska 20 ns, energija bliska 100 mJ). Intenziteto svetlobe na mestu obdelave smo nastavili tik pod mejo ablacije na površini aluminija, in sicer z nastavljanjem parametrov vzbujanja (gonilna napetost bliskavke) ter z nastavitvijo premera žarka na mestu obdelave. Kot vzorec nam je rabila aluminijasta plošča debeline 20 mm, ki je bila na strani obdelave prevlečena s slojem barve debeline od 0,1 do 0,15 mm. Površina druge strani vzorca je bila zrcalno polirana. Plošča je bila pritrjena na dvodimenzionalno pozicionirno mizico, s katero smo zagotovili računalniško voden pomik obdelovanca prečno proti čistilnemu žarku med obdelavo oziroma napram merilnemu žarku med fazo merjenja profila kraterja. Uporabili smo tehniko suhega čiščenja površine³.

Proces čiščenja smo spremljali s tremi merilniki:

- Michelsonov interferometer s kompenziranim krakom (ACMI)^{2,5} nam je omogočal opazovanje premika zrcalne površine aluminijastega vzorca. Pomik je posledica na mestu obdelave generiranega optodinamskega signala, ki se širi po vzorcu do zadnje površine. Pasovna širina kompenzacijske povratne zanke referenčnega kraka interferometra v



Slika 1: Shema eksperimenta laserskega odstranjevanja barve in sistema za spremljanje procesa

Figure 1: Experimental set-up of laser-based decoating and monitoring system

območju od 0 Hz do 1 kHz izniči vibracijske in temperaturne vplive okolice, hkrati pa ne pači koristnega signala, ki se nahaja v frekvenčnem območju nekaj MHz.

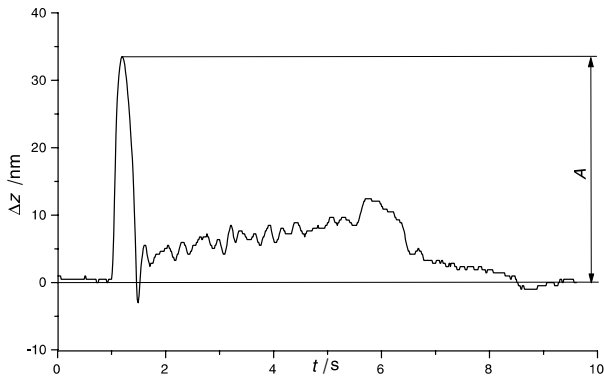
- Lasersko odklonsko sondo (LBT)^{2,3,4} smo uporabili za opazovanje optodinamskega signala, ki se sferično širi v zračni polprostor iz mesta obdelave na vzorcu. Merilni žarek je potekal vzporedno z oslojeno površino vzorca na oddaljenosti 4 mm nad mestom obdelave in vpadal na površino bipolarne fotodiode. Slednja rabi za detekcijo odmika merilnega žarka, ki je posledica spremembe gostote plina nad mestom obdelave.
- Laserski anamorfni profilomer (LAP) smo uporabili za merjenje profila kraterja, ki je nastajal med obstreljevanjem oslojene površine z laserskim žarkom. Sestavljen je iz laserskega črtnega projektorja in 12-bitne CCD-kamere (ločljivost 1024 x 1024 točk). Merjenje je temeljilo na principu laserske triangulacije⁶. Merilnik v osnovi meri profil kraterja, s pomikanjem v smeri pravokotno na črto projektorja pa lahko izmeri tridimenzionalno površino kraterja, kar je v nadaljevanju omogočalo izračunavanje globine in volumna odstranjenega materiala. Zahtevano merilno območje merilnika (širina x višina = 20 mm x 5 mm) smo zagotovili z uporabo anamornega objektivna kamere.

Postavitev eksperimenta z navedenimi merilniki je prikazana na **sliki 1**. Kot izvir merilnega laserskega žarka za ACMI in LBT smo uporabili He-Ne-laser (valovna dolžina 633 nm, CW-moč 10 mW), katerega žarek smo optično razdelili z uporabo delilca žarka (BS1) in ogledal (M2, M3) na oba merilnika. Signala obeh merilnikov smo zajemali z digitalnim osciloskopom, povezanim s PC. Slednji je skrbel za proženje čistilnega laserskega bliska, zajemanje podatkov iz osciloskopa in iz digitalne kamere ter za krmiljenje pomika vzorca med čiščenjem oziroma merjenjem profila kraterja.

3 MERITVE

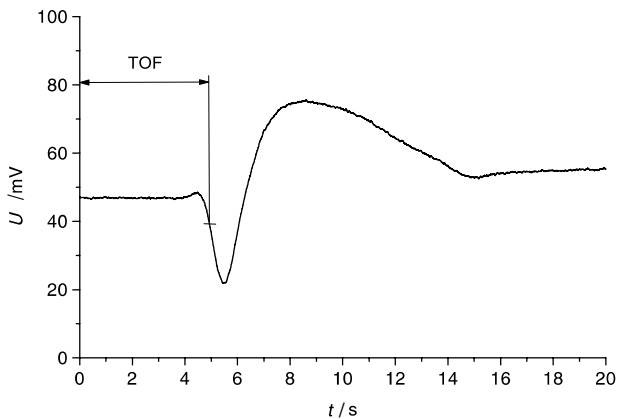
Površino vzorca smo obstreljevali z zaporednimi laserskimi bliski. Posameznemu blisku je sledil zajem signalov z ACMI in LBT ter prenos v PC. Meritev se je nadaljevala s skeniranjem mesta kraterja z LAP in izračun njegovega volumna. Z zadostnim številom laserskih bliskov smo zagotovili popolno odstranitev barve na mestu vpada čistilnega žarka. Proces čiščenja površine smo večkrat ponovili.

Primeri zajetih signalov sta prikazana na **sliki 2** (za ACMI) in **sliki 3** (za LBP). V fazi obdelave signalov smo za vsak laserski blisk izmerili karakteristične parametre optodinamskih signalov, kot so maksimalna amplituda (A), integral (I) in čas preleta udarnega vala (TOF). Na **sliki 4** je prikazanih nekaj vmesnih oblik kraterja, ki smo ga preskenirali po vsakem blisku. Iz



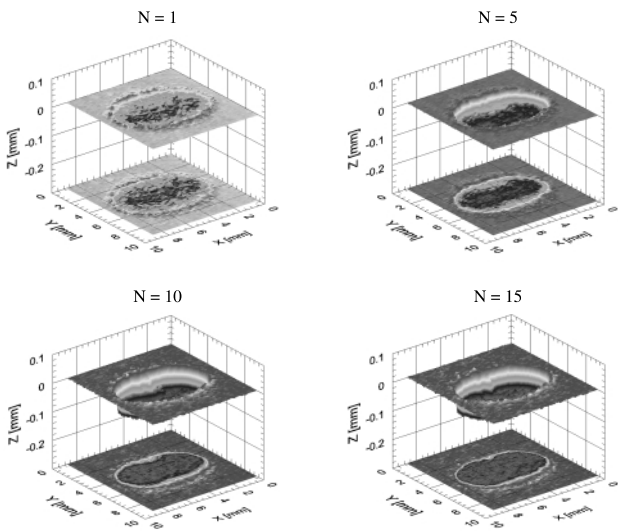
Slika 2: Pomik hrbtnje površine vzorca v odvisnosti od časa, izmerjen s kompenziranim Michelsonovim interferometrom (ACMI)

Figure 2: Displacement of sample's rear side as a function of the time measured with the arm-compensated Michelsons interferometer (ACMI)



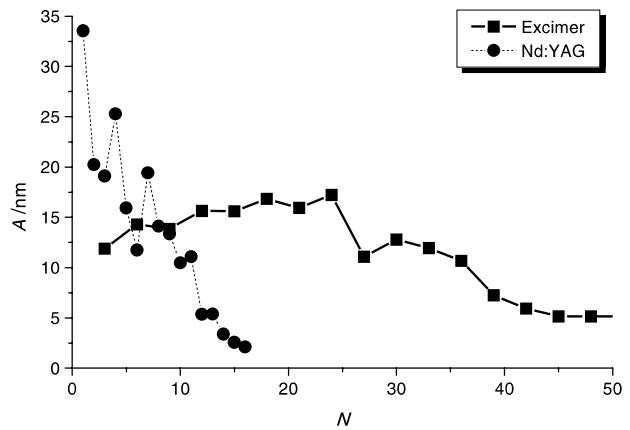
Slika 3: Signal laserske odklonske sonde (LBP) kot sprememba napetosti na fotodiodi v normiranih enotah (p.e.) v odvisnosti od časa

Figure 3: The acquired signals from the laser-beam probe (LBP) as voltage on the photodiode in average units (au) vs. time (t)



Slika 4: Oblika kraterja po prvem, petem, desetem in petnajstem laserskem blisku, izmerjena z laserskim anamorfnim profilmerom (LAP)

Figure 4: Shape of the ablated area after the first, fifth, tenth and fifteenth laser pulse, measured by the laser anamorph profilomer (LAP)



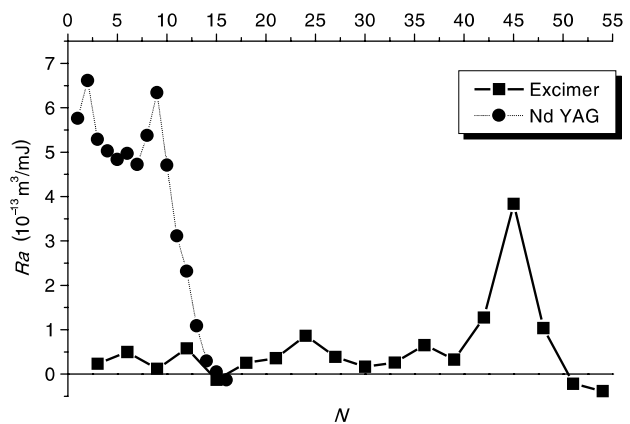
Slika 5: Odvisnost med amplitudo (A) optodinamskega signala ACMI in laserskimi bliski (N) pri ekscimerem in Nd:YAG-laserju

Figure 5: Relationship of the optodynamic signal amplitude (A) acquired by the ACMI to the laser pulse (N) with excimer and Nd:YAG sources

tridimenzionalne površine smo izračunali globino in volumen kraterja.

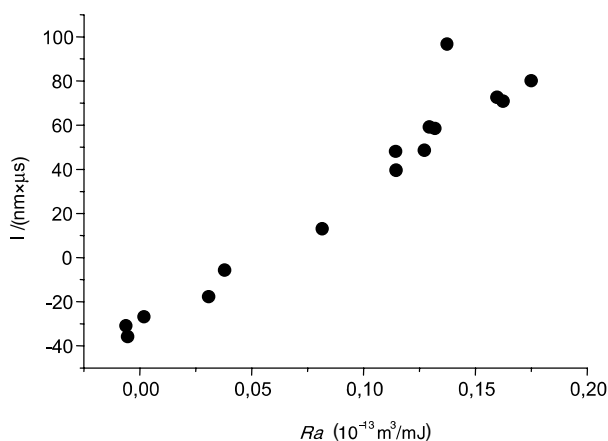
Pri primerjavi rezultatov procesa odstranjevanja barve z ekscimerjem in Nd:YAG-laserjem je jasno, da imajo značilni parametri pri prvem drugačno odvisnost od števila bliskov kot pri drugem. **Slika 5** prikazuje odvisnost amplitude optodinamskega signala ACMI v odvisnosti od števila bliskov za oba čistilna laserja. Ob koncu procesa amplituda signala pri Nd:YAG pade skoraj na 0, pri ekscimerju pa ostane še vedno opazno velika. Opazna je tudi razlika v hitrosti odstranjevanja. Z Nd:YAG-laserjem potrebujemo ~15 bliskov, z ekscimer laserjem pa ~50 bliskov za odstranitev enake količine barve.

Slika 6 prikazuje odvisnost učinkovitosti odstranjevanja barve od števila bliskov pri Nd:YAG laserju. Učinkovitost odstranjevanja barve R_a je razmerje med odstranjenim volumnom snovi in energijo laserskega bliska⁸. Če uporabimo ekscimer kot čistilni laser, je učinkovitost čiščenja na začetku nižja, vendar proti



Slika 6: Odvisnost učinkovitosti odstranjevanja barve (R_a) od laserskih bliskov (N) pri ekscimerem in Nd:YAG laserju

Figure 6: Relationship of ablation rate (R_a) to the laser pulse (N) with excimer and Nd:YAG sources



Slika 7: Povezava med učinkovitostjo odstranjevanja barve (R_a) in integralom optodinamskega signala ACMI pri Nd:YAG- izviru

Figure 7: Correlation of ablation rate (R_a) and integral of optodynamic signal of the ACMI at the Nd:YAG source

koncu procesa močno naraste. Pri Nd:YAG-izviru pa je proces vseskozi enako učinkovit, dokler na koncu učinkovitost odstranjevanja ne pade na vrednost 0. To pomeni, da je osvetljevano področje popolnoma očiščeno barve. Učinkovitost odstranjevanja barve je z Nd:YAG-laserjem dosti višja kot z ekscimernim, kar je tudi zahtevalo nadaljnje izvajanje eksperimentov samo s prvim.

Slika 7 prikazuje povezavo med integralom optodinamskega signala ACMI in učinkovitostjo odstranjevanja barve R_a . S slike je lepo razvidna linearna korelacija med obema veličinama. Ker obstaja direktna povezava med prvim in drugim, za spremljanje procesa laserskega odstranjevanja zadošča že samo merjenje optodinamskega signala, saj lahko ob poznanju snovnih parametrov samo iz njegovega integrala določimo količino odstranjene snovi. Negativne vrednosti učinkovitosti čiščenja R_a (**slika 7**) so posledica napake merjenja površine kraterja v zaključni fazi odstranjevanja.

Primerjali smo tudi rezultate, dobljene z ACMI in LBP. Korelacije so v obeh primerih zelo podobne, s tem da se pri LBP pojavi večja disperzija, kar pa je v največji meri posledica rahlega spreminjanja razdalje vzorecsondin žarek, za kar je ta instrument izredno občutljiv.

Do spreminjanja te razdalje je prišlo zaradi premikanja vzorca med postopkom skeniranja kraterja z LAP.

4 SKLEP

V tem članku smo predstavili tehniko spremljanja procesa laserskega odstranjevanja barve z dvema različnima bliskovnima laserjema (ekscimer in Nd:YAG). Sistem za nadzor procesa je sestavljen iz treh merilnikov: ACMI in LBP sta namenjena zajemanju optodinamskih signalov, LAP pa za merjenje profila kraterja.

Ugotovili smo, da je Nd:YAG-laser bolj učinkovit pri odstranjevanju barve kot ekscimerni, zato smo nadaljnje eksperimente izvajali samo z Nd:YAG-laserjem. Primerjali smo različne parametre optodinamskega signala in rastočega kraterja, pri čemer smo ugotovili, da obstaja linearna korelacija med integralom optodinamskega signala in količino odstranjene snovi. Tako je že samo iz optodinamskega signala in parametrov snovi mogoče določiti količino odstranjene snovi.

Primerjali smo tudi rezultate, dobljene z ACMI in LBP, in ugotovili, da so med seboj primerljivi. Disperzija je pri LBP nekoliko večja, vendar sta oba merilnika primerna za spremljanje procesa laserskega odstranjevanja barve.

5 LITERATURA

- ¹ P. W. Fecsk, F. A. Lancaster, *Laser-Based Paint Decoating Process*, Metal Finishing, 98 (2000) 11, 10-14
- ² Lovoi, et al., Method of and apparatus for the removal of paint and the like from a substrate, United States Patent, 4 (1986), 588-885
- ³ V. B. Bregar, J. Možina, *Optoacoustic analysis of the laser-cleaning process*, Applied surface science, 185 (2002), 277-288
- ⁴ J. Diaci, J. Možina, *Optical detection and analysis of nonlinear optoacoustic waves*, Physical Acoustics: Fundamentals and applications, ed. Leroy O., Breazedale M. A., Plenum (1990)
- ⁵ C. H. Palmer, R. E. Green, *Mat.Eval.* 35 (1978), 10
- ⁶ Donges Axel, *Lasermesstechnik*, Heidelberg, Hüthig (1993)
- ⁷ Sidney F. Ray, *Applied Photographic Optics*, Focal press (1994)
- ⁸ X. Zhou, K. Imasaki, H. Furukawa, H. Umino, K. Sakagishi, S. Nakai, C. Yamanaka, *Simulation study and experiment on laser-ablation surface cleaning*, Optics & Laser Technology, 33 (2001), 189-194