

LASERSKO ČIŠČENJE KOT OPTODINAMSKI PROCES

LASER CLEANING AS AN OPTODYNAMIC PROCESS

Vladimir Boštjan Bregar, Janez Možina

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

Prejem rokopisa - received: 2001-04-26; sprejem za objavo - accepted for publication: 2001-07-10

Zadnji dve desetletji poteka razvoj nove tehnike čiščenja površin, čiščenje z laserskim žarkom. Za popolno razumevanje laserskega čiščenja in nadaljnji razvoj tehnike je treba raziskati in razumeti optodinamske procese pri osvetljevanju površine z laserskim žarkom. V tem članku želimo prikazati sistem za zaznavanje optodinamskih mehanizmov pri laserskem čiščenju. S primerjavo meritev analiziramo optodinamske pojave ter njihovo povezavo s potekom procesa. Na osnovi eksperimentalnega sistema predlagamo sistem za optodinamski nadzor, s katerim v realnem času spremljamo potek laserskega čiščenja.

Ključne besede: lasersko čiščenje, optodinamika, mehanizmi čiščenja, laserska odklonska sonda

During the last two decades a technique for the laser cleaning of surfaces has been developed. In order to understand and further improve this technique one should understand the optodynamic processes during the interaction of a laser beam with a surface. The aim of this article is to introduce a system for the detection of the optodynamic mechanisms of laser cleaning. With a comparison of measurements one can examine optodynamic mechanisms and their relation with advance of process. In this article we will also present a method for online measuring of the optoacoustic signal during the laser-cleaning process. With an examination of this acoustic signal, one can follow the progress of the cleaning process and determine the relative cleanness of the surface.

Key words: laser cleaning, optodynamics, cleaning mechanisms, laser-beam deflection probe

1 UVOD

Čistoča površine je bistven parameter mnogih industrijskih procesov. Lasersko čiščenje površin je ena izmed novih tehnik, ki se hitro razvija in uveljavlja v industriji poleg klasičnih načinov čiščenja površin¹. Za nadaljnji razvoj metode in širšo uporabnost v industriji pa je treba razumeti potek celotnega procesa.

Lasersko čiščenje je optodinamski proces, kjer z zaporednimi laserskimi pulzi osvetlimo in segrejemo površino vzorca². Ključni mehanizem je zelo hitro segrevanje snovi, kar dosežemo s kratkim laserskim pulzom (<100 ns). Hitro segrevanje površine povzroči tudi hitro raztezanje vzorca in s tem velik pospešek površine. Nečistoče se pri tem bodisi odlepijo zaradi pospeška površine bodisi zaradi segrevanja uparijo. Vsak zaporedni laserski pulz odstrani del nečistoče, dokler ni površina čista. Pri čiščenju zaradi optodinamskih pojavov nastane v okoliskem zraku optoakustični (OA) val, ki se razširja v okolico^{3,4}. Nastanek tega vala je povezan s stanjem površine in potekom čiščenja, zato lahko OA-val uporabimo pri sprotnem nadzoru poteka procesa.

V predhodnih študijah³⁻⁶ je bila kot merilni parameter vzeta amplituda optoakustičnega vala, ki je bil merjen z mikrofonom, primerjan pa je bil tudi frekvenčni spekter izmerjenega signala. Iz obeh količin naj bi se dalo določiti čistočo površine pri posameznem pulzu. Uporabljeni mikrofoni so imeli navzgor omejeno frekvenčno območje pri okoli 20 kHz. To je precej nižje kot frekvenčno območje optoakustičnega vala, ki je okoli

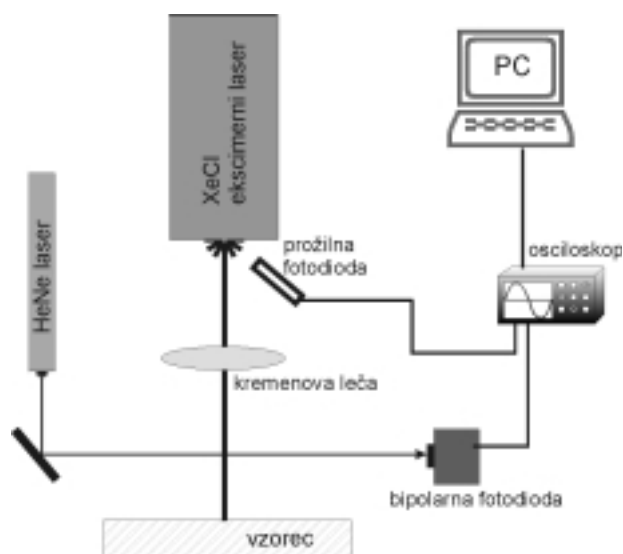
MHz. Iz tako izmerjenih signalov ne moremo dobiti vse informacije o zvočnem valu, zato je treba uporabiti detekcijski sistem s širšim frekvenčnim območjem.

V tem članku predlagamo eksperimentalni sistem za opazovanje optoakustičnega vala z lasersko odklonsko sondo. Iz zajetih signalov smo določili bistvene parametre in jih primerjali s stanjem površine. Eksperimentalno smo potrdili nastanek udarnih valov in korelacijo med udarnimi valovi ter potekom procesa. Na podlagi rezultatov nato predlagamo sistem za sprotno optodinamsko spremljanje poteka procesa čiščenja.

2 EKSPERIMENTALNI SISTEM

Eksperimentalni sistem je prikazan na **sliki 1**. Kot izvir laserskega žarka smo uporabili XeCl ekscimerni laser (Lambda Physik LPX 100), katerega žarek smo usmerili skozi kremenovo lečo (D=50 mm, f=+100 mm) na površino vzorca. Površino smo osvetljevali z UV svetlobo ($\lambda=308$ nm), dolžina pulzov je bila 20 ns. Vpadna energija na enoto površine je bila okoli 0,3 J/cm².

Proženje čistilnega pulza smo zaznali s hitro fotodiodo, ki je sprožila zajemanje podatkov na osciloskopu (LeCroy Waverunner LT344). Optoakustični val smo zaznavali z lasersko odklonsko sondo, razdalja med sondnim žarkom in vzorcem je bila L= 4,2 cm. Ob prehodu OA-vala preko sondnega žarka se le-ta zaradi gradienta gostote v valu odkloni. Odklon žarka smo opazovali z bipolarno fotodiodo, ki smo jo priključili na osciloskop.



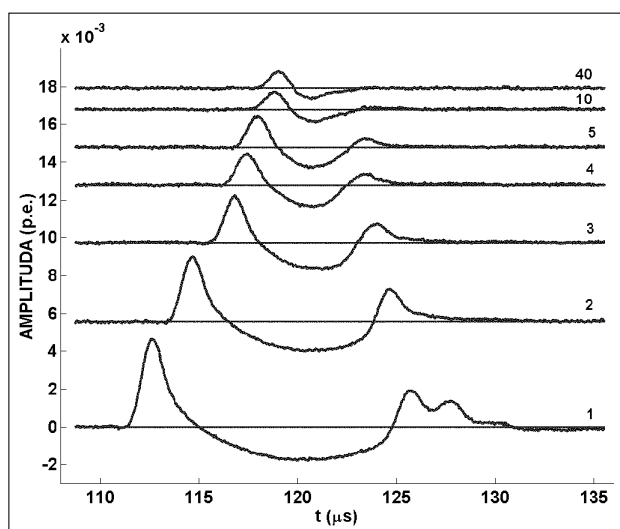
Slika 1: Shema eksperimentalnega sistema za lasersko čiščenje površin in optodinamski nadzor procesa

Figure 1: Experimental set-up for laser cleaning of surfaces and optodynamic monitoring of the process

Kot vzorec smo vzeli polirano nerjaveče jeklo (AISI 304), katerega površino smo najprej očistili z acetonom. Na očiščeno površino smo nanесли kapljo destilirane vode z raztopljenimi delci kaolina ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$). Površino smo osušili, tako da je tam nastala plast delcev, podobna vodnemu kamnu. Proste delce smo odstranili s curkom zraka.

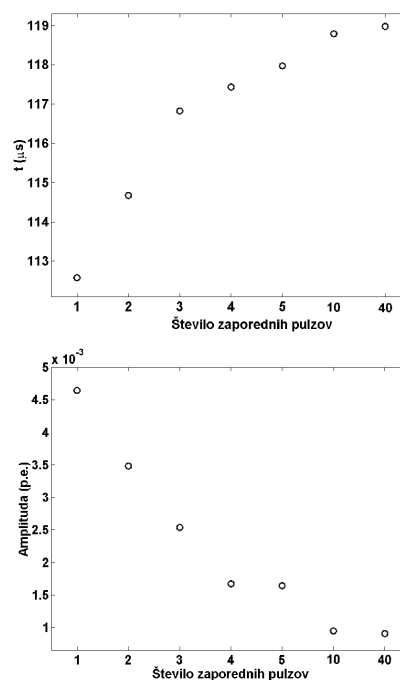
3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Pri naših eksperimentih smo optodinamski signal pri laserskem čiščenju zaznavali z lasersko odklonsko son-



Slika 2: Zaporedni signali pri laserskem čiščenju. Številke poleg signalov označujejo število čistilnih pulzov

Figure 2: Measured signals generated during laser cleaning. Numbers beside the signals denote the number of cleaning pulses

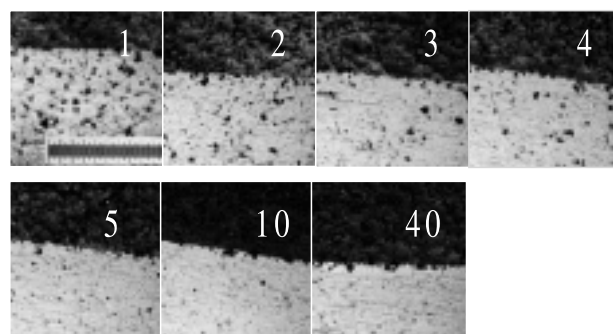


Slika 3: Čas prihoda in amplituda zajetih signalov za zaporedne čistilne pulze

Figure 3: Time-of-flight and amplitude of the measured signals

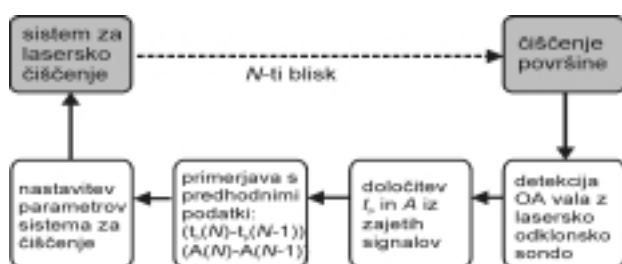
do. Zajeti signali so prikazani na **sliki 2**. Številka poleg signala označuje število zaporednih čistilnih pulzov na isto površino, amplituda signala je predstavljena v poljubnih enotah.

Ko primerjamo zaporedne signale, opazimo, da se med potekom procesa spreminjajo tako oblika signalov kot tudi čas prihoda in amplituda signala. Na obliko signala vpliva poleg načina nastanka tudi razširjanje in slabljenje OA-vala ter prenosna funkcija odklonske sonde, ki je odvisna od geometrije valov ⁷. Ker je oblika odvisna od tako različnih dejavnikov, iz same oblike težko analiziramo nastanek OA-vala. Pri obdelavi



Slika 4: Posnetki površine vzorca po zaporednih čistilnih pulzih. Številka ob sliki pomeni število zaporednih pulzov na površino. Temno področje je onesnaženo, svetlo pa osvetljeno področje. Skala na prvi sliki označuje 1 mm na vzorcu

Figure 4: Images of the sample surface, cleaned with a different number of laser pulses. Numbers beside the images correspond to the signal numbers. A dark region on the image is a contaminated surface and a bright region is an irradiated area. The scale on the first image represents 1 mm on the surface



Slika 5: Shema krmilne zanke za optodinamski nadzor poteka laserskega čiščenja

Figure 5: Control-loop diagram for the optodynamic monitoring of the process of laser cleaning

signalov smo zato kot merilna parametra privzeli amplitudo in čas prihoda signala, ki ustreza času preleta OA-vala od vzorca do žarka sonde.

Na **sliki 3** je prikazan potek vrednosti obeh parametrov med laserskim čiščenjem. Amplituda signala je najvišja pri prvem pulzu in se z nadaljnjimi pulzi manjša, dokler ne doseže konstantne vrednosti. To se ujema z ugotovitvami v literaturi ^{4,6}. Nasprotno pa se čas prihoda signala z zaporednimi pulzi daljša in po nekem številu pulzov doseže konstantno vrednost.

Za primerjavo vrednosti obeh parametrov s stanjem površine smo posneli osvetljeno površino vzorca z digitalno kamero preko mikroskopa. Na **sliki 4** so prikazane slike površine, ki smo jih osvetlili z različnim številom čistilnih pulzov. Z zaporednimi pulzi se število delcev na površini zmanjšuje, dokler površina ni čista oziroma odstranjevanje ne poteka več. Iz zaporednih slik je razvidno manjšanje števila delcev na površini, po desetem pulzu pa se videz površine ne spreminja več. To se ujema s približevanjem obeh parametrov h konstantni vrednosti. S primerjavo **slik 3 in 4** torej ugotovimo povezanost obeh merilnih parametrov s potekom procesa čiščenja.

Amplitudo zajetega signala lahko povežemo s skokom gostote v OA valu, čas prihoda pa je obratno sorazmeren s hitrostjo razširjanja tega vala. Povprečno hitrost razširjanja OA-vala dobimo, če razdaljo med vzorcem in žarkom sonde delimo s časom prihoda signala $v_{\text{povp}} = L/t_{\text{prihoda}}$. Hitrost razširjanja pri prvem pulzu je 375 m/s in je nadzvočna, medtem ko je pri zadnjih dveh signalih okoli 350 m/s, kar se ujema s hitrostjo razširjanja zvočnega vala c_0 .

Nadzvočno razširjanje OA-vala lahko razložimo z nastankom optoakustičnega udarnega vala ob površini vzorca. Na onesnaženi površini je jakost izvira udarnega vala sorazmerna stopnji odstanjevanja nečistoč. S prvimi pulzi odstranimo večino nečistoče s površine, zato imajo ustvarjeni udarni valovi velik skok gostote in hitrost razširjanja ($v > c_0$) ⁸. Z nadaljnjimi čistilnimi pulzi odstranimo še preostalo nečistočo in pri tem nastanejo šibkejši udarni valovi, ki imajo manjši skok gostote in se počasneje razširjajo, a so še vedno nadzvočni ($v > c_0$).

Pri čisti površini nastanejo le zelo šibki udarni valovi, katerih hitrost razširjanja je konstantna, $v \approx c_0$. Z merjenjem časa prihoda in amplitude signalov torej opazujemo potek odstranjevanja nečistoč s površine in ocenimo zaključek procesa. S tem lahko primerjamo in preučimo posamezne mehanizme čiščenja.

Na podlagi teh ugotovitev smo predložili sistem za optodinamski nadzor poteka procesa čiščenja, kjer z lasersko odklonsko sondo spremljamo čas preleta in amplitudo OA-vala. Čeprav bi lahko spreminjanje stanja površine opazovali z vsakim parametrom posebej, pa primerjava obeh parametrov zmanjšuje negotovost meritev. Ker oba parametra določamo iz enega signala brez dodatnih meritev, povečamo zanesljivost sistema. Na **sliki 5** je prikazana shema krmilne zanke za nadzor procesa. V zanki spremljamo spremembe obeh parametrov pri zaporednih čistilnih pulzih. Ko parametra dosežeta konstantni vrednosti, čiščenje ne poteka več in lahko prenehamo prožiti čistilne pulze.

4 SKLEPI

Pri optodinamski karakterizaciji procesa laserskega čiščenja smo z lasersko odklonsko sondo opazovali optoakustične valove, ki nastanejo med procesom. Iz zajetih signalov smo določili merilna parametra sistema in potrdili povezanost parametrov s stanjem površine. Iz meritev smo določili nadzvočno razširjanje optoakustičnih valov in s tem potrdili nastanek udarnih valov pri laserskem čiščenju. Z analizo izmerjenih časov preleta valov lahko preučimo posamezne mehanizme in ocenimo njihovo učinkovitost. Na osnovi eksperimentalnega sistema in dobljenih rezultatov smo predložili sistem za sprotni optodinamski nadzor čiščenja in krmilno zanko za krmiljenje poteka procesa.

5 LITERATURA

- ¹Tam A. C., Park H. K., Grigoropoulos C. P., *Laser cleaning of surface contaminants*, Appl. Surf. Sci. 127-129 (1998) 721-725
- ²Tam A. C., Zapka W. et al., *Laser-cleaning techniques for removal of surface particulates*, J. Appl. Phys., 71 (1992) 3515-3523
- ³Cooper M. I. et al., *Characterisation of laser cleaning of limestone*, Optics&Laser Tech., 27 (1995) 69-73
- ⁴Stauter C., Fontaine J., Engel T., Biernaux A.: *Optical and acoustical monitoring of material processing with Q-switched Nd:YAG and excimer laser radiation*, SPIE 2246 (1994) 16-24
- ⁵Lu Y. F., Lee Y. P. et al, *Acoustic wave monitoring of cleaning and ablation during excimer laser interaction with copper surfaces*, Appl.Surf.Sci. 119 (1997) 137-146
- ⁶Lee J. M., Watkins K. G., *Real-time surface monitoring in the laser cleaning of copper for soldering processes*, Lasers in Engineering, 8 (1999) 229-239
- ⁷Diaci J., *Response function of the laser beam deflection probe for detection of spherical acoustic waves*, Rev.Sci.Instrum. 63 (1992) 5306-5310
- ⁸Landau L. D., Lifshitz, *Fluid mechanics*, Pergamon Press, 1959