

## OPTODINAMSKI VIDIK VARJENJA ALUMINIJA S PULZNIH LASERJEM Nd:YAG

### OPTODYNAMIC ASPECTS OF ALUMINUM WELDING WITH A PULSED Nd:YAG LASER

**Aleš Gorkič<sup>1</sup>, Janez Diaci<sup>1</sup>, Ladislav Grad<sup>2</sup>, Aleš Babnik<sup>1</sup>, Janez Možina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup> Fotona, d. d., Stegne 7, 1210 Ljubljana, Slovenija

*Prejem rokopisa - received: 2002-10-09; sprejem za objavo - accepted for publication: 2003-02-25*

Prispevek predstavlja rezultate raziskave optodinamskih pojavov, ki nastanejo med varjenjem aluminija s pulzno lasersko svetlobo. Raziskava je bila opravljena z namenom, da bi pridobili informacije, pomembne za optimizacijo tehnologije varjenja. Optoakustični valovi, ki jih med varjenjem detektiramo z lasersko odklonsko sondo, vsebujejo koristne informacije o dinamiki varilnega procesa. Znatna razlika med snovnimi lastnostmi aluminija in oksidne plasti na njegovi površini povzroča nezaželeno in nekontrolirano dinamiko procesa. Da bi izboljšali stabilnost in ponovljivost procesa, uporabljamo dvovrstne laserske pulze: s prvim pulzom najprej odstranimo oksidno plast, z drugim pa nato varjenca zvarimo.

Ključne besede: lasersko varjenje aluminija, optodinamski pojavi, laserska odklonska sonda

This paper presents the results of an investigation of optodynamic phenomena generated during pulsed-laser welding of aluminum. The investigation was performed for the purpose of gathering information relevant to the optimization of welding technology. Optoacoustic waves detected by a laser-beam deflection probe during the welding process contain valuable information about the process dynamics. Substantial differences in the material properties of bulk aluminum and the surface oxide layer result in undesired and uncontrolled process dynamics. To increase the stability and repeatability of the welding process two different laser pulses are used, the first one removes the oxide layer whereas the second one performs the stable welding process.

Keywords: laser aluminum welding, optodynamic phenomena, laser-beam deflection probe

## 1 UVOD

Aluminij velja zaradi svojih fizikalno-kemičnih lastnosti (dobra toplotna prevodnost, visoka optična odbojnost,...) z vidika laserskega varjenja za težko variv material <sup>1</sup>, zato je za raziskovalce iskanje novih rešitev na področju tehnologije laserskega varjenja poseben izziv <sup>2,3</sup>.

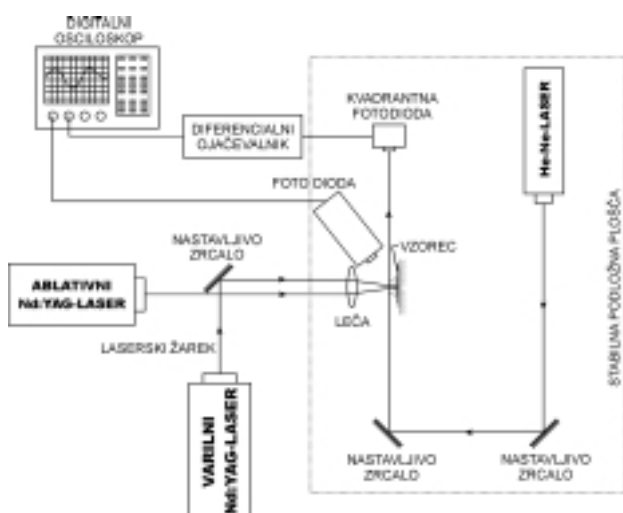
Naše dosedanje raziskave na področju varjenja aluminija z laserjem <sup>4,5</sup> so pokazale, da je z uporabo standardnih laserskih izvorov možno zagotavljati zahtevano kvaliteto zvarov samo na ozkem področju parametrov, kar pa je v industrijskem okolju težko zagotavljati. Potreba po nadzoru dinamskih pojavov nas je privedla k uporabi časovno spremenljivih laserskih pulzov in razvoj nove metode nadzora laserskega varjenja, ki temelji na optodinamski detekciji <sup>5</sup>.

Predloženi sestavek opisuje rezultate raziskave nove metode laserskega varjenja aluminijevih zlitin z uporabo dveh vrst laserskih pulzov. Prvi pulz, imenovan tudi ablacijski in je razmeroma kratek, na obsevani površini odstrani nečistoče in oksidno plast. Tako je površina pripravljena za naslednji, daljši pulz, ki nato varjenca dejansko zvari. Z zajemanjem in analizo optodinamskih signalov, zajetih med varjenjem, dobivamo pomembne informacije o poteku procesa. Cilj raziskave je razviti metodo, ki bi omogočila zagotavljanje stabilne kvalitete zvarov tudi v industrijskem okolju.

## 2 EKSPERIMENTALNI DEL

Eksploimentalni sistem, ki je omogočil razvoj metode laserskega varjenja z dvovrstnimi laserskimi pulzi in optodinamsko detekcijo, prikazuje **slika 1**. Lasersko varjenje je bilo realizirano z žarkoma iz dveh laserskih izvorov Nd:YAG: ablativnega (energija < 800 mJ, čas pulza 7 ns) in varilnega (energija < 40 J, čas pulza < 20 ms). Uporaba dveh izvorov omogoča veliko fleksibilnost pri spreminjanju varilnih parametrov, kar je pomembno z vidika optimizacije parametrov za različne aplikacije. Sinhronizacija delovanja obeh izvorov in možnost spreminjanja časovnega zamika med ablativnim in varilnim pulzom sta bila dosežena s posebnim mikroprocesorskim krmilnikom, ki je bil razvit posebej za ta namen.

Optodinamski signali, ki nastanejo med varjenjem z dvovrstnimi pulzi, se detektirajo z lasersko odklonsko sondo <sup>6</sup>. Prednost tovrstne detekcije je v tem, da detektor ne vpliva na širjenje detektiranih valov. Sondirni žarek se generira s stabiliziranim He-Ne laserskim izvorom valovne dolžine 633 nm in z močjo 10 mW. Sondirni žarek je voden preko zrcal, tako da poteka vzporedno z varjencem na razdalji nekaj mm nad mestom varjenja (**slika 2**). Ob interakciji med laserskimi pulzi in površino nastane v zraku nad mestom interakcije močno neravnovesno polje gostote zraka, ki se v obliki akustičnih valov širi v prostor. Fluktuacije gostote v valu odklanjajo



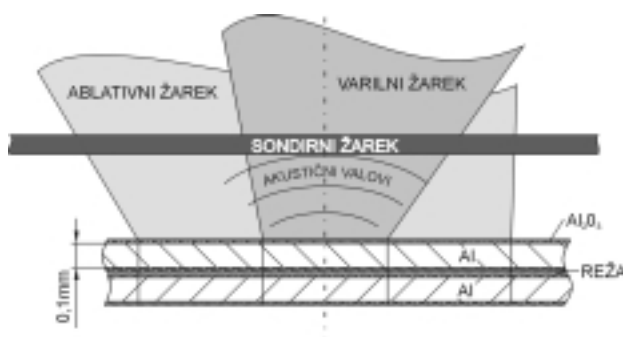
**Slika 1:** Shema eksperimentalnega sistema  
**Figure 1:** Scheme of the experimental system

laserski žarek, odklon pa se s hitro kvadrantno fotodiodo PIN pretvori v električno napetost.

Hkrati z optodinamskimi signali je s hitro Si PIN-fotodiodo zajet del svetlobe, ki jo oddaja obsevana površina med interakcijo z lasersko svetlobo. Občutljivost fotodiode je razmeroma majhna, tako da detektira predvsem odbito svetlobo obeh laserskih pulzov.

V nadaljevanju opisani eksperimenti so bili izvedeni na varjencih, izdelanih iz Al-folij debeline 0,098 mm iz materiala z oznako AF11, ki ima naslednjo kemično sestavo: Si 0,13 % - 0,20 %, Fe 0,4 % in druge primesi < 0,01 %.

Varjenci so bili varjeni paroma v prekrivnem spoju. Pri takšnem varjenju sta poseben problem oksidni plasti na stični površini obeh varjencev. Oksid ( $Al_2O_3$ ) ima glede na Al za velikostni red nižjo toplotno prevodnost oziroma difuzivnost ter bistveno višjo temperaturo tališča <sup>7</sup>, zaradi česar sta oksidni plasti precejšnja ovira za prehod toplote med varjencema. Dodatna ovira je tudi zračna reža med oksidnima plastema (slika 2). Precej



**Slika 2:** Skica geometrije varjencev in laserskih žarkov (Debeline oksidnih plasti in zračne reže so zaradi nazornosti prikazane močno povečane.)

**Figure 2:** Sketch of the geometry of weld-pieces and laser beams (the thicknesses of the oxide layers and of the air gap are exaggerated for the sake of clarity)

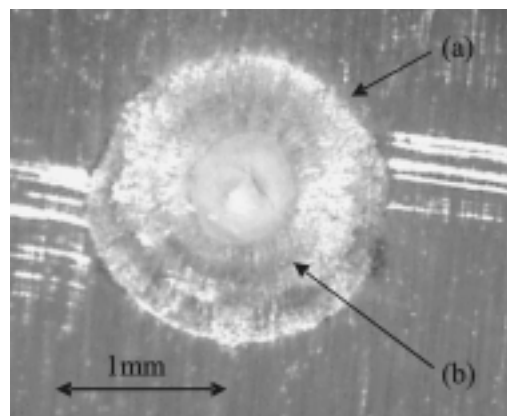
dovedene toplote se zato hitro prevaja po obsevani Al-foliji, zaradi česar se le-ta pretali na večjem obsegu, kot bi bilo smotno. Toplotni stik je bil izboljšán tako, da smo konstruirali posebno vpenjalno napravo, ki je varjenca stisnila z dovolj veliko silo.

Varilni žarek je bil fokusiran tako, da je imel v gorišču, ki je bilo na površini varjenca, premer 1,4 mm (slika 2). Za ugotavljanje primernih parametrov varilnega pulza smo spreminjali vršno moč pulza in njegovo dolžino. Izkazalo se je, da je treba za dober zvar uporabiti relativno majhno vršno moč (1200 W) in dolg pulz (20 ms). Glede na časovni potek pulza je bila energija laserskega pulza približno 24 J. Tako je bila na površini varjenca dosežena vršna svetlobna jakost (intenziteta) približno 80 kW/cm<sup>2</sup>. Pri večjih vršnih močeh in krajših časih pulza je prišlo do preluknjanja folij, ne da bi bili zvarjeni. Ablativni žarek je imel v gorišču, ki je bilo na površini varjenca, nekoliko večji premer od varilnega (1,8 mm). Tako je ablativni žarek dosegel na površini varjenca vršno svetlobno jakost do 4,5 GW/cm<sup>2</sup>.

### 3 REZULTATI

V preliminarni raziskavi interakcije med ablativnimi laserskimi pulzi in površino aluminija smo ugotovili, da obstaja za določeno površino in sestavo materiala območje optimalne gostote energije ablativnega pulza, ki odstrani s površine nečistoče (in oksidno plast) in tako pripravi kontrolirano stanje za pričetek varjenja. Opazili smo, da v primeru, ko je gostota energije na meji praga ablacije, že majhna variacija energije ablativnega pulza in stanja površine pred obsevanjem lahko povzročita znatne variacije učinkov ablacije. Prevelike gostote energije povzročijo preveliko hrapavost površine.

Pri študiju varjenja z dvovrstnimi laserskimi pulzi smo ugotovili, da je sicer s to metodo mogoče doseči



**Slika 3:** Fotografija zvara, dobljenega z dvovrstnimi laserskimi pulzi (puščica (a) označuje rob ablativnega žarka, puščica (b) pa rob varilnega žarka)

**Figure 3:** Photograph of a weld obtained by the two-pulse method (arrows (a) and (b) designate edges of the ablative beam and the welding beam respectively)

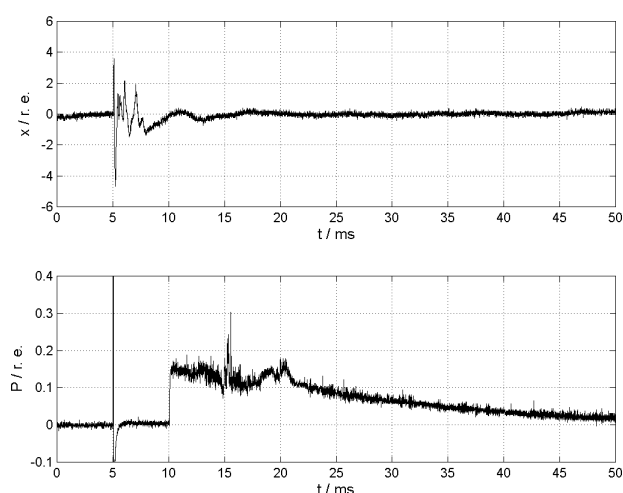
bolj stabilno kvaliteto zvarov kot pri enopulzni metodi, vendar je območje varilnih parametrov, ki to omogočajo, še vedno izredno ozko. Dobre rezultate smo dosegli le v primerih, ko je bil ablativni pulz vsaj 5 ms pred varilnim. Domnevamo, da je ta čas dovolj dolg, da pride po ablativni odstranitvi oksidne plasti do ponovne oksidacije površine, pri čemer je ta tanjša, kot je bila prvotna. To kaže, da je vloga ablativnega pulza predvsem v pripravi površine, da dosežemo bolj podobne začetne pogoje pri različnih zvarnih točkah.

**Slika 3** prikazuje sprednjo (obsevano) površino dobrega zvara, ko je bila zakasnitev med pulzoma 5 ms. Na sliki je dobro viden ablativni krater in približno v njegovi sredini varilni. Dno varilnega kraterja je včasih razpokano, te pa na spodnji površini niso opazne, kar kaže na to, da je v območju kraterja spoj razmeroma slab. Na robu varilnega kraterja je material narinjen nad nivo prvotne površine. Nosilnost zvara je torej omejena na predel pod robom kraterja. V primerjavi z dobrimi zvari so slabi mnogo bolj razpokani.

Potek odziva laserske sonde na **sliki 4** (zgoraj) je značilen za dober zvar. Močan udarni val, ki ga povzroči ablativno razbitje oksidne plasti, v celoti preide odklonski žarek približno v času 5 ms, nato je posvetil varilni pulz. V času varilnega pulza odklonska sonda ne zazna novih mehanskih motenj.

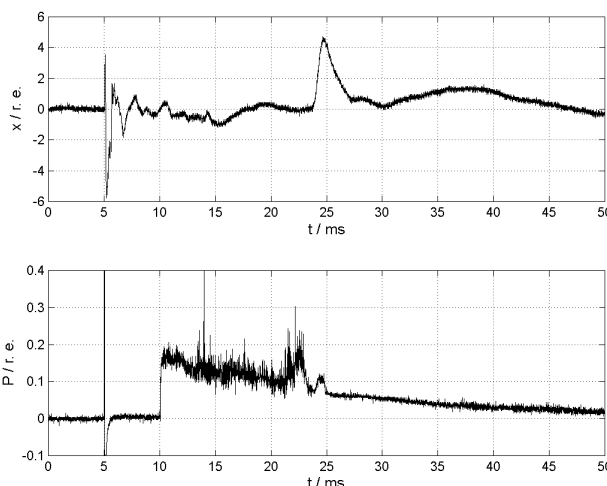
Odziv senzorja odbite svetlobe na **sliki 4** (spodaj) kaže značilne fluktuacije, ki so posebej intenzivne v času 5 ms po pričetku varilnega pulza, nato pa se sčasoma umirijo. Dolg "rep" varilnega pulza se zdi pomemben zato, ker preprečuje prehitro strjevanje taline, ki bi povzročilo pokanje.

Potek odziva laserske sonde (**slika 5**, zgoraj) je značilen za slab zvar. Udarni val, ki ga povzroči



**Slika 4:** Odziva laserske sonde (zgoraj) in senzorja odbite svetlobe (spodaj), zajeta pri varjenju dobrega zvara (ordinati v relativnih enotah)

**Figure 4:** Responses of the laser-beam deflection probe (upper trace) and the photodiode detecting reflected laser light (lower trace) acquired during welding of a good weld (ordinates in relative units)



**Slika 5:** Odziva laserske sonde (zgoraj) in senzorja odbite svetlobe (spodaj), zajeta pri varjenju slabega zvara (ordinati v relativnih enotah)

**Figure 5:** Responses of the laser-beam deflection probe (upper trace) and the photodiode detecting reflected laser light (lower trace) acquired during welding of a poor weld (ordinates in relative units)

ablativno razbitje oksidne plasti, sicer preide odklonski žarek približno v času 5 ms, vendar mu takoj sledijo nove mehanske motnje. Sprva so njihove amplitude majhne, vendar pa jim po približno 18 ms od pričetka varilnega pulza sledi velika, ki po obliki že spominja na udarne valove. Mehanske motnje, ki jih detektira sonda, so povezane z večjimi fluktuacijami v odzivu senzorja odbite svetlobe (**slika 5**, spodaj). Pred večjo spremembo v odklonskem signalu opazimo bistveno povečanje amplitude fluktuacij.

Po opravljenem varjenju smo ocenili trdnost nekaterih zvarov, tako da smo zvarni spoj raztrgali. Če je bil zvar dober, potem se je pretrgal osnovni material, kot je to razvidno s **slike 6**. Če pa je bil zvar slab, potem se je pretrgala zvarna točka, če je sploh prišlo do zvaritve.

#### 4 Diskusija

Oksidna plast na površini, ki jo obsevamo z laserjem, ima pomembno vlogo pri laserskem varjenju. Za lasersko svetlobo Nd:YAG je prosojna, tako da omogoča,



**Slika 6:** Fotografija dobrega zvara po nateznem preizkusu  
**Figure 6:** Photograph of a good weld after the tearing test

da prodre do površine Al, kjer se absorbira in pretvori v toploto. Zaradi polikristalne mikrostrukture se del vpadle svetlobe siplje, kar verjetno zmanjšuje svetlobni tok, ki prodre do površine Al. Bolj kot sipanje se zdijo problematične mikroskopske nečistoče na površini oksida, ki so lahko močno absorptivne in povzročajo lokalno močnejše segrevanje, kar zopet slabo vpliva na ponovljivost procesa varjenja, ker so naključno porazdeljene. Z vidika prevoda toplote je slaba toplotna prevodnost oksidne plasti na obsevani površini ugodna - omogoča, da se več toplote koristno porabi za taljenje Al.

Optodinamski signali dajejo pomembne informacije o ablativnem razbijanju oksidne plasti pri varjenju z dvovrstnimi laserskimi pulzi. Signal laserske sonde je pri varjenju z dvovrstnimi pulzi zelo izrazit (**sliki 4 in 5**, zgoraj), pri varjenju z enovrstnimi pulzi pa v mnogih primerih sploh ni zaznaven. Mehanizem ablativnega razbijanja oksidne plasti ima naravo lokalnih mikroeksplozij. Do absorpcije ablativnega pulza pride v tanki plasti Al, ki je tik pod (presojno) površino oksida. Plast Al se segreje do uparitve, pri čemer je uparjalni tlak tolikšen, da eksplozivno razbije oksidno plast. Lokalna mikroeksplozija odstrani oksidno plast, udarni val, ki pri tem nastane, se širi v okoliški zrak in ga detektiramo z lasersko sondo. Amplituda in trajanje signala odklonske sonde sta povezana z intenziteto procesa odstranjevanja oksidne plasti.

Pomembno vlogo pri tem lahko igra tudi zrak, ujet v reži med varjencema, ki se močno segreje in pritiska na staljeni Al. Ko je le-ta pretaljen po celotni debelini in popusti tudi površinska oksidna plast, lahko segreti zrak, če ga je dovolj, odrine ali celo izbrizga Al talino. Pri tem lahko pride do tvorbe kapljic staljenega Al, ki eksplozivno zgorijo v zraku, kar lahko vodi do tvorbe močnih udarnih valov. To bi lahko pojasnilo močan udarni val, ki ga vidimo v odzivu laserske sonde na **sliki 5** (zgoraj) po približno 14 ms po pričetku varilnega pulza.

V odzivih senzorja odbite laserske svetlobe (**sliki 4 in 5**, spodaj) so v času trajanja varilnega pulza opazne dokaj močne fluktuacije, ki jih povezujemo z delno

koherentnim odbojem na hrapavi površini oksidne plasti in na površini Al. Med obsevanjem z varilnim žarkom pride do intenzivnega segrevanja ter toplotnega raztezanja Al in oksidne plasti, kar spreminja porazdelitev odbite laserske svetlobe - svetle pege, ki so posledica delno koherentnega odboja, tako spreminjajo svoj položaj v prostoru. Domnevamo, da pride do povečanih fluktuacij zlasti takrat, ko popustita srednji oksidni plasti in pride do mešanja taline.

## 5 SKLEP

Pri študiju ablativnega odstranjevanja oksidne plasti med varjenjem smo z analizo signalov odklonske sonde ugotovili, da je proces odstranjevanja oksidne plasti močno podoben lokalnim površinskim mikroeksplozijam ter da signal laserske odklonske sonde daje pomembne informacije o intenziteti procesa odstranjevanja oksidne plasti.

Z analizo detektiranih signalov odklonske sonde, dobljenih na zvarih različne kvalitete, smo ugotovili, da je ta signal zelo dober indikator nezaželenega poteka varjenja. Signali, posneti pri dobri zvarih, so pokazali, da med varjenjem le-teh praktično ni optodinamskih pojavov, ki bi povzročili odklon žarka. Pri nekaterih slabih zvarih smo detektirali odklonske signale oblik, značilnih za mikroeksplozije, kar je mogoče pojasniti z eksplozivnim zgorevanjem (oksidacijo) kapljic Al-taline.

## 6 LITERATURA

- <sup>1</sup> C. Marley, M. Rodighiero, WDM Solutions, avgust 2001, 991-491
- <sup>2</sup> H. Zhao, D. R. White, T. DebRoy, International Materials Reviews, 44 (1999) 6, 238-266
- <sup>3</sup> J. Rapp, Opt. & Quant. El., 27 (1995) 1203-1211
- <sup>4</sup> L. Grad, Nd:YAG laser spot welding of thin aluminium, IIW/IIW 50th Annual Assembly, San Francisco, 1997, IIW Doc: IV-671-97
- <sup>5</sup> L. Grad, J. Možina, Optoacoustic monitoring of laser beam welding, Conference on Lasers and Electro-optics Europe, Hamburg, 1996, 202
- <sup>6</sup> J. Diaci, J. Možina, Appl. Surf. Sci., 69 (1993) 321-325
- <sup>7</sup> J. Wilson, J. F. B. Hawkes, Lasers, Principles and Applications, Prentice Hall International UK, London, 1987, 174