

LASERSKO REPARATURNO VARJENJE TERMORAZPOK NA ORODJIH ZA TLAČNO LITJE ALUMINIJA

LASER REPAIR WELDING OF THERMAL CRACKS ON ALUMINIUM DIE CASTING DIES

Matej Pleterski¹, Janez Tušek¹, Ladislav Kosec³, Damjan Klobčar¹, Mitja Muhič²,
Tadej Muhič²

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

²TKC, d. o. o., Trnovska 8, 1000 Ljubljana

³Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana

Prejem rokopisa – received: 2007-09-20; sprejem za objavo – accepted for publication: 2008-07-02

Sanacija poškodovanih in izrabljenih orodij je ukrep, s katerim lahko v veliki meri povečamo produktivnost in zmanjšamo proizvodne stroške. Zato se v zadnjem času vedno več uporablja laserska tehnologija, katere prednost je predvsem v ozkem lokalnem delovanju toplotne energije, majhni toplotno vplivani coni in zanemarljivih obrobnihih zajedah. Orodja za tlačno litje so med delovanjem izpostavljena kompleksnim termomehanskim obremenitvam in s tem visokim napetostim na površini, ki povzročijo utrujanje materiala in nastanek razpok. V članku je predstavljena tehnologija sanacije razpok (žlebljenje, varjenje) z bliskovnim Nd:YAG-laserjem, vključno z analizo mikrotrdot ob sami razpoki, žlebu in varu. Rezultati kažejo na to, da je z laserjem mogoče relativno hitro in enostavno odstraniti utrujeno območje ob razpoki, ga navariti ter tako orodje usposobiti za obratovanje.

Ključne besede: tlačno litje, orodja, razpoke, poprava, lasersko navarjanje, aluminij

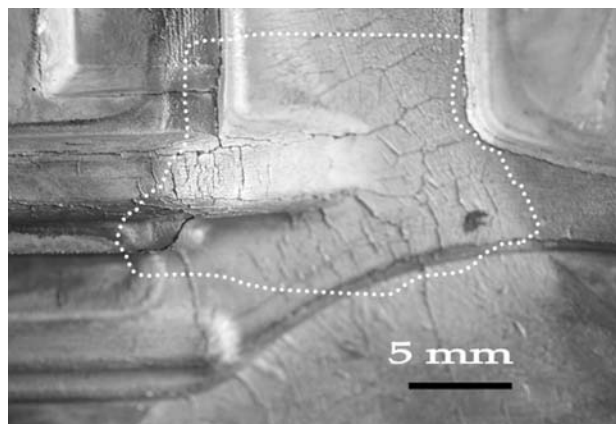
Repair welding of damaged and worn-out tools is a measure, which can increase productivity and lower production costs to a great extent. For this purpose, laser technology has recently been used with major benefits such as localized heating effect, narrow heat effected zone and negligible undercuts. In the die-casting process, dies are submitted to a complex thermo mechanical stressing and high stresses on the surfaces of dies are induced. That may lead to thermal fatigue cracking. In this paper, the technology of thermal cracks repair (grooving, welding) with pulsed Nd:YAG laser is described. A micro-hardness analysis of areas surrounding cracks, grooves and welds has been performed, also. The test results suggest that it is relatively fast and easy to eliminate the fatigue area surrounding the cracks, and with proper welding to reestablish the tool operability.

Key words: die casting, dies, cracks, repairing, laser welding, aluminium

1 UVOD

Lasersko varjenje je ena izmed prvih industrijskih aplikacij laserja. Ta alternativna tehnologija daje nove možnosti obdelave, dodelave in sanacije, kjer je varjenje z drugimi varilskimi metodami oteženo ali celo onemogočeno. V to vrsto laserske obdelave spada tudi lasersko reparaturno zvarjanje in navarjanje, ki je relativno nova tehnologija in se vedno bolj uveljavlja v livarski, orodjarski ter drugi strojni industriji za sanacijo in vzdrževanje orodij. Orodja za tlačno litje so izdelana iz kakovostnih jekel za delo v vročem, ki so dobro odporna proti toplotnim deformacijam, šokom ter termičnim razpokam na površini. Ena izmed najpomembnejših karakteristik orodja je trdota. Pri orodjih za tlačno litje barvnih kovin mora biti le-ta okoli $HRC = 45$. Za povečanje trajnostne dobe jih lahko še nitriramo in s tem povečamo njihovo površinsko odpornost proti obrabi. Orodja so med uporabo izpostavljena kompleksnim termomehanskim obremenitvam in s tem visokim napetostim na površini, ki povzročijo utrujanje materiala ter nastanek razpok na površini, ne glede na vrsto materiala, toplotno obdelavo in vrsto oplemenitenja

površine orodja. Na **sliki 1** je prikazana tipična termična razpoka, ki se močno izraža tudi na odlitku. Takšni odlitki so nesprejemljivi, zato je treba orodja med obratovalno dobo sanirati. Zato so se navadno uporabljali procesi, kot so brušenje, rezkanje in obločno varjenje. Z laserjem je mogoče razpoko izžlebiti, pa tudi

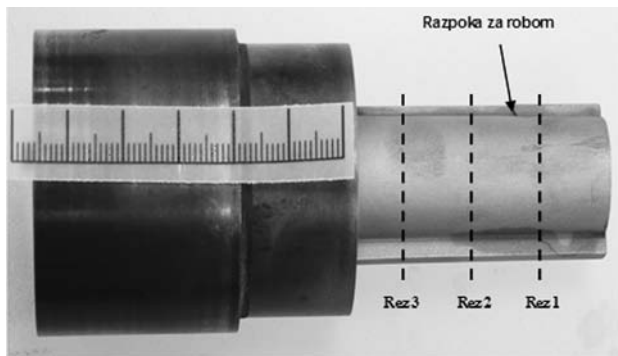


Slika 1: Odtisi temen razpok zaradi termičnega razpokanja na ulitku
Figure 1: Imprints of cracks on a cast, as a result of thermal cracking

zavariti. Sun in sod.^{1,2} so napravili študiji o trajnodinamični in natezni trdnosti ter žilavosti po pretaljevanju razpok, ki so nastale pri trajni dinamični obremenitvi pri povišanih temperaturah. Treba je poudariti, da je šlo pri obeh njihovih raziskavah zgolj za pretaljevanje razpok brez dodajanja materiala. Vedani in sod.³ so opravili študijo s poudarkom na razvoju mikrostruktur in metalurških problemih pri reparaturnem varjenju površinsko obdelanih orodnih jekel. Nekateri avtorji^{4,5} so raziskovali lasersko reparaturno varjenje na različnih področjih. Brown in sod. domnevajo, da je lasersko reparaturno varjenje razpok na ladijskih pločevinah bolj učinkovito kot varjenje z obločnimi postopki zaradi krajših časov in nižjih stroškov.

2 EKSPERIMENTALNI DEL

Ekspirimenti so bili izvedeni na obrabljenem stranskem jedru orodja za tlačno litje koluta za navijanje varnostnega pasu v avtu, vzdolž katerega je potekala razpoka. Orodje iz materiala 1.2343 (X38CrMoV5-1), kaljeno na trdoto 45 ± 2 HRc (450 ± 30 HV) je prikazano na **sliki 2**. Orodje je bilo na začetku odrezano na rezu 1. Ta kos se je rabil za analizo trdote ob razpoki. Razpoko na preostalem delu orodja se je nato požlebilo z bliskovnim Nd:YAG-laserjem moči 120 W. Po žlebljenju je bilo orodje odrezano na rezu 2. Drugi kos se je rabil za analizo trdote ob žlebu. Preostanek orodja je bil nato zavarjen z dodajnim materialom Uddeholm G3 premera 0,5 mm in odrezan na rezu 3. Uporabljeni parametri za žlebljenje in varjenje so prikazani v **tabeli 1**. Pri izžlebljenju z laserskim žarkom je treba izbrati parametre z visoko gostoto energije v gorišču laserskega žarka. Material, tj. jeklo, je bilo treba upariti in ga odstraniti iz razpoke. Za žlebljenje je zahtevana gostota energije več kot 10^{10} W/m². To se doseže z nastavitvijo visoke moči na laserskem izvoru in izbiro leče s kratko goriščno razdaljo. Parametri za varjenje morajo biti prilagojeni predvsem velikosti izžlebljenega utora in premeru uporabljene žice. V obeh primerih je bil kot zaščitni plin uporabljen Ar čistote 99,9996 %. Iz odrezanih delov orodja so bili napravljeni makroobrusi, na katerih so bile nato opravljene meritve mikrotrdot po



Slika 2: Stransko jedro z označenimi področji razreza
Figure 2: Test specimen with marked cuts

Vickersu pri obremenitvi 100 g oz. sili 0,981 N. Vsi vzorci so bili jedkani z nitalom (4 %). Meritve so bile opravljene na treh globinah orodja: (0,3, 0,6 in 1) mm. Zaradi boljše preglednosti so v nadaljevanju predstavljene zgolj meritve trdot na globini 1 mm.

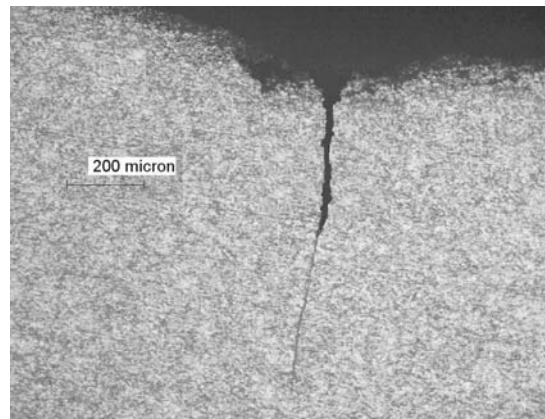
Tabela 1: Prikaz nastavitvenih parametrov pri laserskem žlebljenju in varjenju razpok

Table 1: Parameters for laser grooving and welding

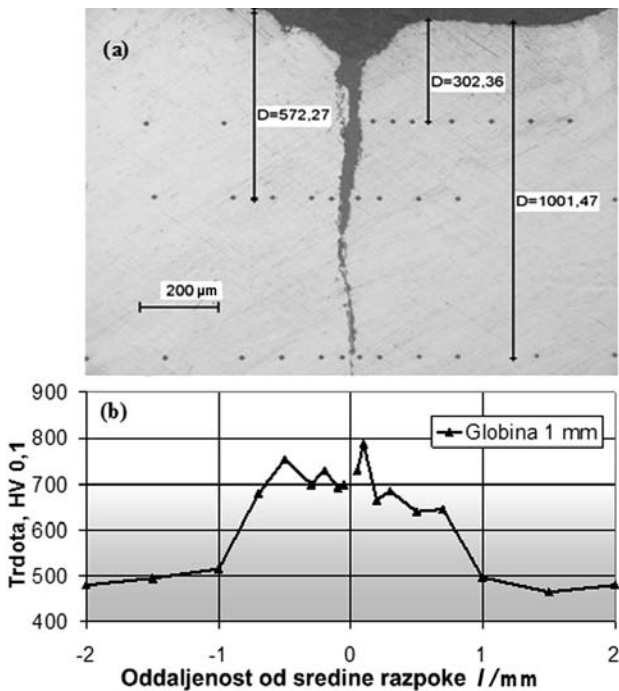
Parameter	Žlebljenje	Varjenje
Frekvenca las. bliskov ν /Hz	6	7,4
Čas trajanja las. bliska t_p /ms	6,2	6,2
Povprečna moč las. bliska P_{pp} /W	900	400
Povp. energija las. bliska E_p /J	15,3	11,9
Goriščna razdalja leče f_l /mm	160	200

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Na **sliki 3** je prikazan makroobrus razpoke. Z meritvami trdote, prikazanimi na **sliki 4 a**, smo ugotovili, da je trdota okoli razpoke višja, kar je razvidno tudi iz diagrama na **sliki 4 b**, kjer je trdota ob razpoki v povprečju za $HV = 200$ višja od normalne trdote orodja. To sicer ni značilno za področja ob termičnih razpokah, tako da lahko sklepamo, da je bilo to orodje pred našo analizo verjetno že sanirano. Navadno trdota materiala ob neposredni bližini termične razpoke rahlo pade, kar je posledica kemijske nehomogenosti jekla v območju ob površini razpoke. Železovi atomi iz sloja pod površino razpoke difundirajo na površino proti kisiku, na prazna mesta pa difundirajo legirni elementi (Cr, Mo, V). Na površini razpoke se tako pojavi plast, ki je v veliki meri sestavljena iz železovih oksidov in oksidov aluminija in silicija, kar je posledica reakcije aluminijeve zlitine in kisika. Na meji te oksidne plasti in osnovnega materiala pa se kopičijo predvsem oksidi kroma. Slaba stran oksidne plasti je nizka temperaturna razteznost, večji volumen in krhkost. Oksidi in aluminijeve zlitine v razpokah povečajo natezne napetosti v klinu razpoke, kar povzroča njihovo rast⁶. Razpoke v nadaljevanju delujejo kot kanali za dovajanje aluminijeve zlitine v razpoko in



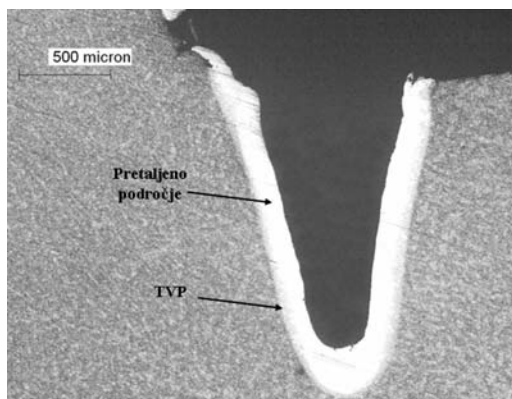
Slika 3: Makroskopska slika termične razpoke
Figure 3: Macro section of a thermal crack



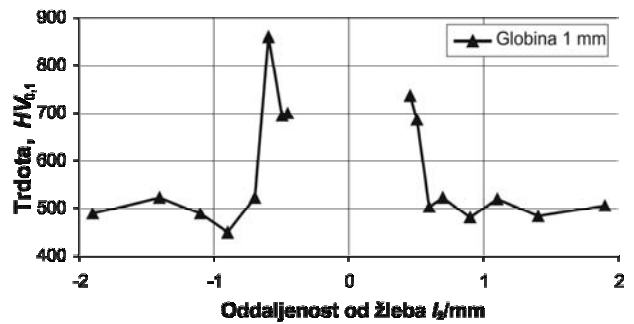
Slika 4: Merilna mesta (a) in profil trdote pravokotno na razpoko (b)
 Figure 4: Location of measurements (a) and the hardness profile in direction perpendicular to the crack (b)

omogočajo penetracijo kisika do konice razpoke, kjer povzroči oksidacijo. Pri nadaljnjem obratovanju takega orodja se razpoka še hitreje širi, postaja vedno globlja in širša. Vse skupaj vodi do nesprejemljivih ulitkov, orodje pa lahko pri nadaljnjem obratovanju v takem stanju počí po celotni globini. Tako poškodovana orodja se navadno sanirajo (če je sanacija sploh še stroškovno upravičena) z rezkanjem razpoke in varjenjem po postopku TIG s predgrevanjem, zajede pa se nato popravijo z laserjem. Pri takšni sanaciji je treba veliko mehanske in toplotne obdelave.

Na sliki 5 je prikazan makroobrus izžlebljene razpoke, na katerem je lepo vidno toplotno vplivano področje in tisto, ki je bilo med žlebljenjem pretaljeno in ponovno zakaljeno (svetel rob tik ob žlebu). Ta, pri-



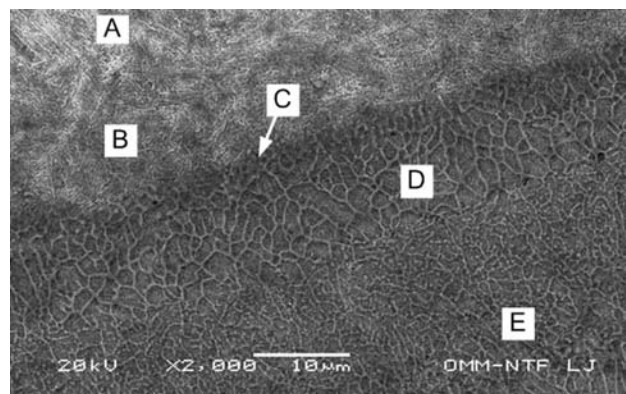
Slika 5: Makroskopska slika izžlebljene razpoke
 Figure 5: Macro section of the groove



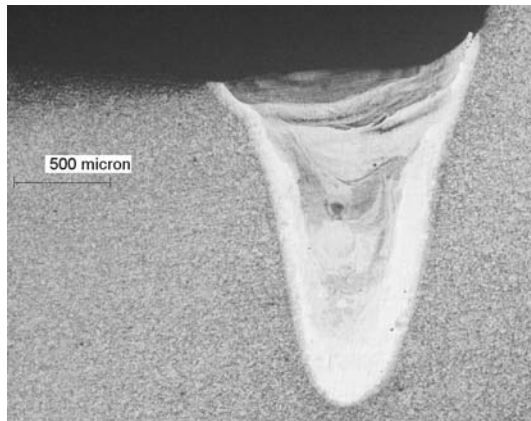
Slika 6: Profil trdote ob zvarnem žlebu
 Slika 6: Hardness profile in the direction perpendicular to the groove

bližno 0,2 mm širok pas se izraža tudi v diagramu meritev trdot, ki je prikazan na sliki 6. Trdote so v tem pasu tudi do $HV = 300$ večje od normalne trdote orodja (izstopajoča meritev, ki sega nad $HV = 850$, je posledica kemične nehomogenosti jekla v tem območju). Iz diagrama je tudi razvidno, da trdota z oddaljenostjo od zvarnega žlebu naglo pada in po 0,2 mm do 0,3 mm doseže normalno trdoto orodja. Razlog za tako visoke trdote je predvsem v relativno veliki gostoti vnesene energije, kar je pogoj za uspešno žlebljenje območja ob razpoki. Ker se orodja v primeru laserskega reparaturnega varjenja varijo v hladnem, se segreti material in talina, ki se ne odstrani iz žleba, znova zakalita. Zaradi velikega temperaturnega gradienta med tem območjem, segretim nad temperaturo tališča jekla, in osnovnim materialom (sobna temperatura) se to območje izredno hitro ohladi in s tem močno zakali. Mikrostruktura, ki nastane v takem primeru, je prikazana na sliki 7.

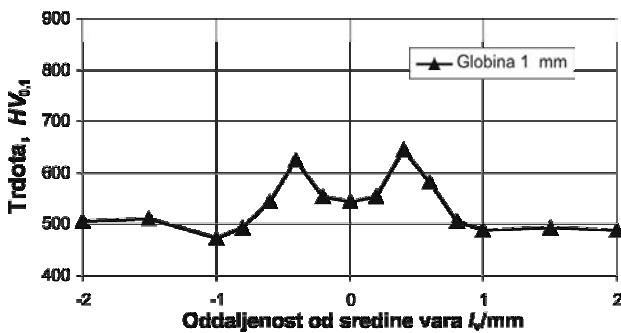
Na sliki 8 je prikazan makroobrus zavarjene razpoke. Meritve trdot na varu so prikazane v diagramu slike 9. Eden izmed ciljev pri reparaturnem varjenju je, da se doseže trdota zvara čim bolj enaka trdoti osnovnega materiala. Na to pa lahko vplivamo predvsem z izbiro



Slika 7: Mikrostruktura jekla ob zvarnem žlebu (Sl. 5): A-osnovni material; B-TVP; C-meja nataljevanja; D-območje celične mikrostrukture, E-območje aksialnih dendritov; SEM (SEI)
 Figure 7: Image of microstructure at the groove: A-base material; B-HAZ; C-solidification line; D-cellular dendrite area; E-axial dendrite area; SEM (SEI)



Slika 8: Makroskopska slika navarjenega zvarnega žleba
Figure 8: Macro section of the welded groove

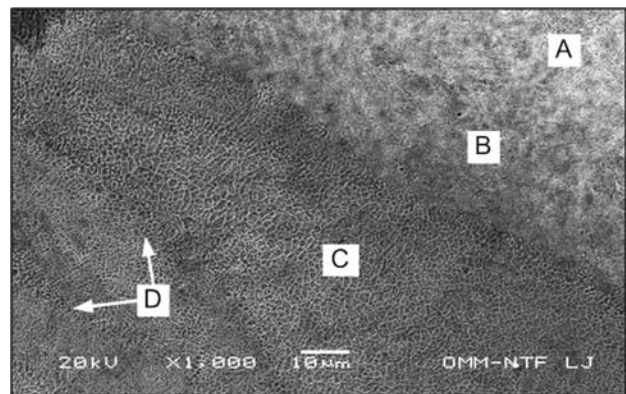


Slika 9: Profil trdote preko zvara
Figure 9: Hardness profile across the weld

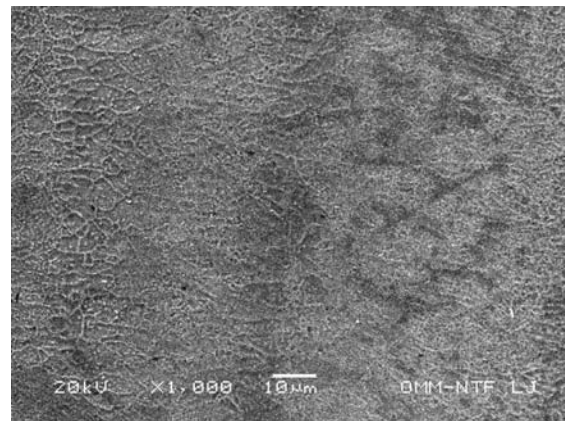
primerne dodatnega materiala in varilnimi parametri. Zaradi majhne količine taline in velikega gradienta temperature uporabljamo pri laserskem reparaturnem varjenju dodatne materiale, ki imajo znižan delež C (0,2 %) in zvišano vsebnost Cr (1,5 %) in Mo (3 %) glede na osnovni material. Prav tako moramo biti pazljivi pri nastavitvi parametrov, da vnesena energija ni prevelika, vendar še tolikšna, da se dodatni material pretali in v celoti zlije z osnovnim. Na sliki 10 je prikazan SEM-posnetek območja na robu zvara, ki je z mešano celično-dendritno mikrostrukturo podobno tistemu ob zvarnem žlebu, zato so tudi trdote v tem prehodnem področju visoke. Mikrostruktura v sredini vara pa je prikazana na sliki 11. Gre za martenzitno mikrostrukturo z redkejšimi neizrazitimi dendriti in trdoto rahlo višjo od osnovnega materiala.

4 SKLEPI

Rezultati raziskave kažejo, da je z lasersko tehnologijo mogoče relativno hitro in enostavno sanirati razpokano orodje. Z ustreznimi parametri laserskega žarka je mogoče razpoko izžlebiti ter tako odstraniti utrujeni material ob razpoki. Čeprav se ob tako pripravljenem



Slika 10: Mikrostruktura jekla na robu zvara: A-osnovni material; B-TVP; C-območje celično-dendritne mikrostrukture; D-pasovi toplotnega vpliva zaradi večvarkovnega polnjenja žleba; SEM (SEI)
Figure 10: Microstructure at the weld boundary: A-base material; B-HAZ; C- dendrite area; D-layers of heat effect of multi-pass groove filling; SEM (SEI)



Slika 11: Mikrostruktura v varu; fina dendritna mikrostruktura; SEM (SEI)
Figure 11: Microstructure in the weld; Fine dendritic microstructure; SEM (SEI)

žlebu pojavi ozko pretaljeno področje, ki se močno zakali, je mogoče ob nastavitvi primernih laserskih parametrov in izbiri pravega dodatnega materiala orodje zvariti tako, da je trdota zvara blizu trdoti osnovnega materiala.

5 LITERATURA

- ¹ Y. Sun, S. Hanaki, M. Yamashita, H. Uchida, H. Tsujii: Vacuum 73 (2004), 655–660
- ² Y. Sun, H. Sunada, N. Tsujii: ISIJ International, 41 (2001) 9, 1006–1009
- ³ M. Vedani: Journal of Materials Science (2004), 241–249
- ⁴ E. Capello, D. Colombo, B. Previtali: Journal of Materials Processing Technology 164–165 (2005), 990–1000
- ⁵ P. M. Brown, G. Shannon, W. Deans, J. Berd: Weld World (1999), 33
- ⁶ F. Kosel, L. Kosec: Mechanical Engineering Journal 29, (1983), E1-E8