

LASERSKO REPARATURNO VARJENJE DUPLEKSNO ZAŠČITENIH ORODNIH JEKEL

Janez Tušek¹, Tadej Muhič², Matej Pleterski¹, Damjan Klobčar¹

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

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

POVZETEK

V delu opisujemo problematiko in razvoj na področju obladovanja vplivnih parametrov laserskega reparaturnega varjenja dupleksnih zaščitnih orodij za tlačno litje.

Laser repair welding of duplex-treated tool steels

ABSTRACT

The topic of the presented paper are the obstacles and the development of proper parameters for laser repair welding of duplex-treated tools for die casting.

1 UVOD

Orodja za tlačno litje so zelo pomembna v hitro razvijajočem se industrijskem svetu. Imajo velik vpliv na produktivnost dobrin, kot so deli avtomobilov, stekleni in polimerni izdelki ter razna ohišja.

Glede na okolje, v katerem orodja za tlačno litje uporabljamo, se pojavljajo tudi tipični razlogi za odpoved oziroma poškodbe le-teh. Glavni razlog poškodb orodij so termične razpoke, ki se pojavijo ob cikličnem obremenjevanju orodij. Drugi razlogi za odpoved so konstrukcijski, saj se pojavijo razpoke zaradi neustreznih oz. zahtevnih konstrukcijskih prehodov v orodjih. Nekaj odpovedi pa se zgodi tudi zaradi erozije površine na bolj izpostavljenih delih orodja. Orodja za brizganje plastike so sicer izpostavljena manjšim delovnim temperaturam, ampak so pri teh orodjih tlačni cikli toliko bolj zahtevni.

Za sanacijo poškodovanih delov orodij najpogosteje uporabljamo reparaturno varjenje. Z njim lahko ob optimalni tehnologiji pravočasno saniramo poškodbe in tako zmanjšamo škodo zaradi zastoja v proizvodnji.

Lasersko reparaturno varjenje se je uveljavilo predvsem za sanacijo manjših vrst obrabe, razpok in

drugih poškodb. Visoka gostota energije omogoča zelo natančno navarjanje poškodovanih mest, kar pomeni, da je obdelava navarov na predpisane mere po varjenju zelo enostavna in hitra. Navarjen sloj je mogoče obdelati ročno, kar omogoča reparaturo tudi tistih orodij, za katere orodjarna nima ustreznega orodja za potopno erozijo.

2 POSTOPKI ZAŠČITE ORODNEGA JEKLA

2.1 Nitiranje

Za zaščito orodij za tlačno litje najpogosteje uporabljamo različne postopke nitiranja, pri katerih utrjujemo površino železovih zlitin z dodajanjem dušika. Nitirana plast zaradi velikih zaostalnih napestosti v difuzijski plasti izboljša obstojnost orodij pri termičnem utrujanju.

Termične razpoke pogosto ostanejo tako lokalizirane v beli plasti ali pa se zaustavijo na meji z difuzijsko plastjo. Nitiranje nam poveča odpornost proti utrujanju, obrabi in koroziji ter zmanjšuje probleme pri čiščenju in ločevanju ulitkov.

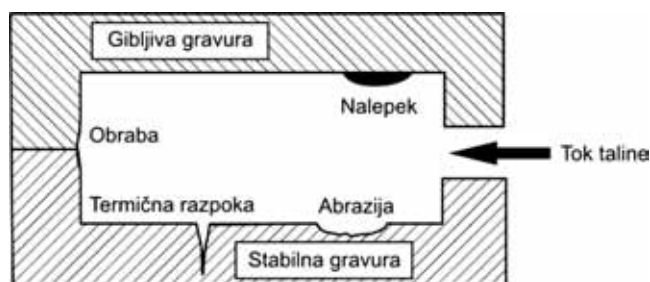
2.2 Oksidacija

Oksidacija je proces, pri katerem se ustvari oksidno plast, ki preprečuje sprijemanje in adhezijsko obrabo pri visokotlačnem litju.

Priporoča se, da se oksidacija izvrši pred prvim preizkusom orodja, saj imajo orodja zaradi kompliciranih oblik na nekaterih območjih velik koeficient trenja ter nezadovoljivo odvajanje toplote. Glavna prednost oksidacije je preprečevanje interakcij taline in površine orodja na delih, kjer so slabe mazalne lastnosti.⁽¹⁾

2.3 PVD-prevleke

Funkcija prevleke je, da zmanjša erozijo, sprijemanje in korozijo. Prevleke morajo biti trde, kemijsko inertne in temperaturno obstojne. Z uporabo trde PVD-prevleke se zmanjša čiščenje površine orodja, zmanjšajo se poškodbe orodij med izbijanjem, kar posledično pomeni zmanjšanje količine maziv. Za zaščito orodij za tlačno litje se predvsem uporabljajo prevleke: CrN, CrC, (Ti,Al)N.



Slika 1: Shematični prikaz vrste poškodb na orodjih za tlačno litje

2.4 Dupleksni postopki

Kombinacije prej opisanih postopkov dajejo najboljše rezultate. Z nitriranjem izboljšamo mehansko nosilnost jekla, medtem ko s trdno prevleko izboljšamo obrabno obstojnost proti eroziji, koroziji in sprijemanju litine na gravuro ⁽²⁾.

Prvi pogoj za uspešno kombinacijo nitrirane plasti in trde prevleke je kompatibilnost strukture in lastnosti posameznih plasti.

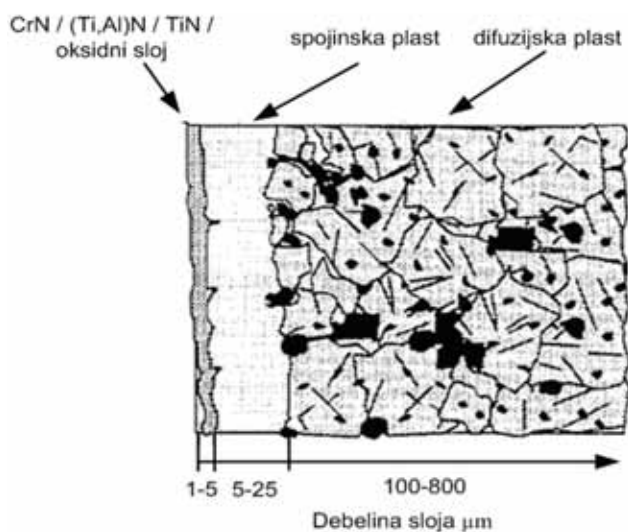
Tako je oprijemljivost trde prevleke odvisna od osnovnega materiala in strukture nitridne plasti (sestava in debelina bele plasti). Zelo pomembno je, da izberemo ustrezno prevleko, saj lahko le tako zagotovimo dobre adhezivne lastnosti prevleke in minimalne razlike pri modulih elastičnosti in termičnih razteznostnih koeficientih.

Vpliv PVD-prevlek na odpornost proti termičnemu utrujanju še ni popolnoma pojasnjen. Razloge za zapoznelo nastajanje in širjenje termičnih razpok lahko najdemo v tlačnih napetostih v prevlekeh in visoki trdoti pri povišanih temperaturah. Vsekakor pa so razlike v termičnih razteznostnih koeficientih med prevlekami in osnovo glavni razlogi za odstopanje prevleke ⁽³⁾.

3 Nd:YAG-LASER

3.1 Značilnosti laserja

Pri Nd-YAG-laserju je kot laserska snov uporabljen trikrat ionizirani neodim, ujet v YAG-ov kristal, ki deluje kot gostitelj. YAG je kompleksen oksid s kemično zgradbo $Y_3Al_5O_{12}$. Količina kovinskih ionov itrija, nadomeščenih z Nd^{3+} , je od 1 % do 2 %. Emitirana valovna dolžina je 1,064 μm . Nd:YAG-laserji so sposobni emitirati svetlobni tok povprečne izhodne moči do nekaj 1000 W. V načinu CW (conti-



Slika 2: Mikrostruktura dupleksno površinsko obdelanega jekla

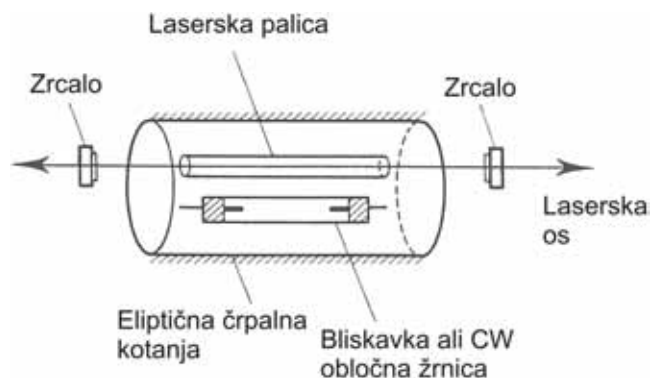
nous wave) delajo pri nekaj sto vatih, pri višjih močeh pa pulzno.

YAG-laser je štirinivojski sistem, kar se izraža v nizkem energijskem pragu za vzpostavitev inverzne populacije. Poleg tega ima YAG relativno veliko toplotno prevodnost, zato ga je mogoče intenzivno hladiti. Kontinuirni YAG-laserji so uravnavani s "Q-switchem" (akusto-optičnim modulatorjem), kar omogoča generacijo več tisoč pulzov na sekundo. Za še krajši čas pulzov pa se za pulziranje uporablja t. i. "mode-locking sistem", s katerim dobimo pulze dolžine razreda pikosekunde.

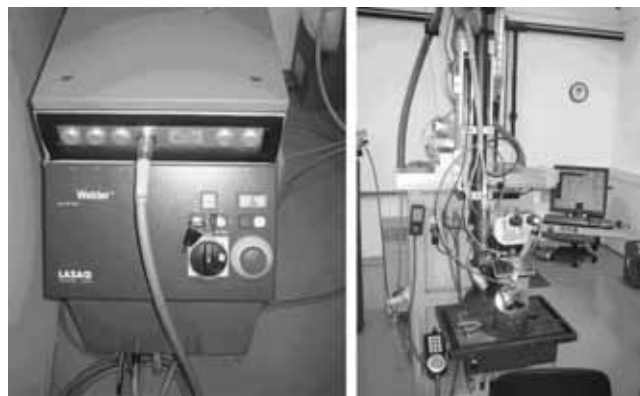
YAG-laserji se uporabljajo za pulzno varjenje prekrivnih spojev, točkovno varjenje, prebadanje (npr. dragih kamnov), reparaturno varjenje, označevanje in rezanje.

3.2 Opis laserskega varilnega sistema

Lasersko navarjanje smo izvajali na Nd:YAG-laserju švicarskega proizvajalca LASAG. Laser proizvaja svetlobo valovne dolžine $\lambda = 1064 \text{ nm}$, ki je po optičnih vlaknih prenesena do optike, s katero fokusiramo žarek. Na napravi lahko nastavljam trajanje laserskih pulzov od 0,1 ms do 10 ms. Laser



Slika 3: Shema eliptične laserske glave za trdninski laser ⁽⁴⁾



Slika 4: Laserski izvirlasnik Easy welder SLS CL 60 (levo) in strežni sistem CNC (desno)



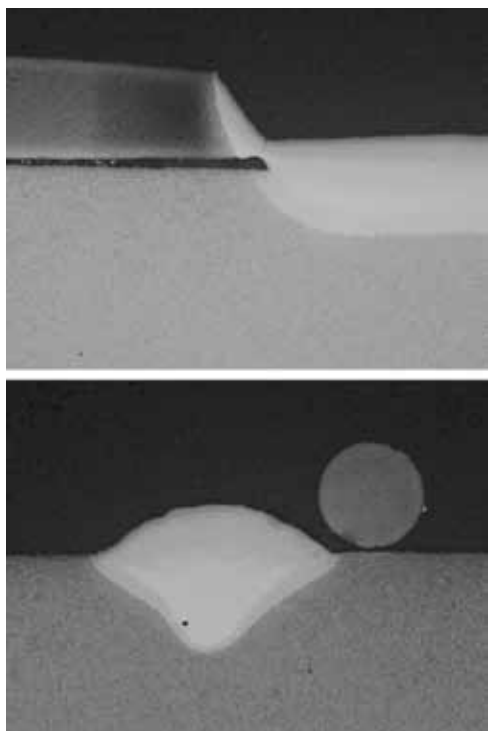
Slika 5: Shematski prikaz taljenja tanke žice pod laserskim žarkom ⁽⁵⁾

omogoča frekvence pulzov od 0,1 Hz do 500 Hz. Maksimalna energija pulza je 70 J.

3.3 Ročno lasersko varjenje

Varilec med laserskim varjenjem vodi žarek z ročno pozicionirno napravo in popolnoma ročno dovaja varilno žico na mesto varjenja. Pred varjenjem mora varilni operater na laserskem izviru določiti parametre žarka. Hitrost varjenja, ki jo uravnava z mehansko napravo in lego, ter hitrost dovajanja žice na mesto pretaljevanja pa mora varilec na podlagi izkušenj določiti med varjenjem.

Varilni operater mora ves čas skozi optično napravo opazovati mesto varjenja in pozicionirati varilno žico v sredino laserskega žarka. Premer žarka v gorišču mora biti vsaj 40 % večji od premera žice, da se tako izognemo varilnim napakam (neprevartvam, zlepom).



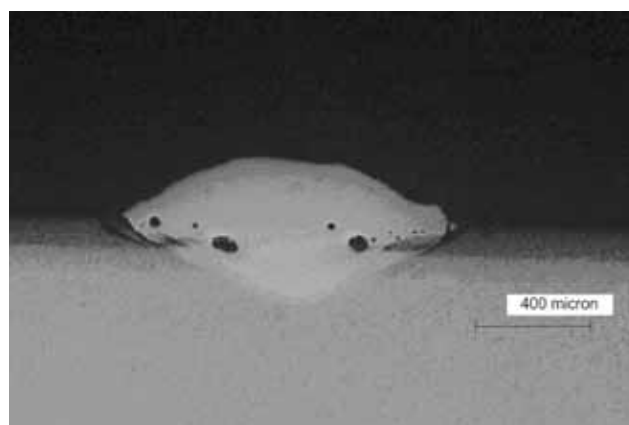
Slika 6: Metalografski prikaz taljenja tanke žice pod laserskim žarkom

4 LASERSKO REPARATURNO NAVARJANJE DUPLEKSNO ZAŠČITENIH ORODNIH JEKEL

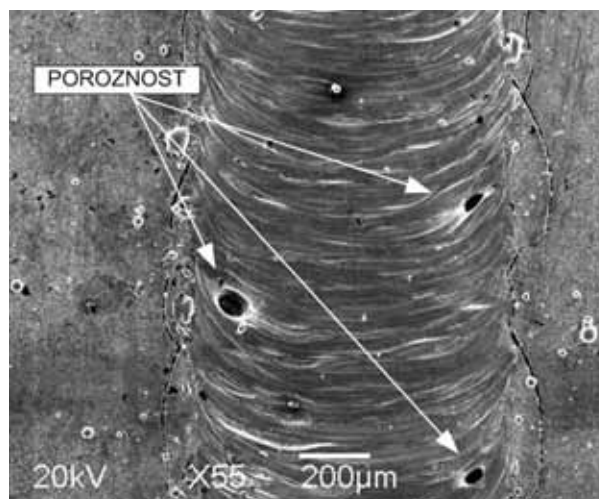
Varjenje nitriranih površin povzroča sproščanje dušika, kar posledično pomeni veliko število por v zvarnem spoju.

Poroznost se navadno formira na robovih zvarnega spoja. Pri varjenju oz. taljenju površine nitrirane plasti se tvorijo plini, ki se dvigajo z dna varilne kopeli. Zaradi narave laserskega varjenja nastaja hipno strjevanje taline, tako da ostanejo plini ujeti na robovih zvarne kopeli.

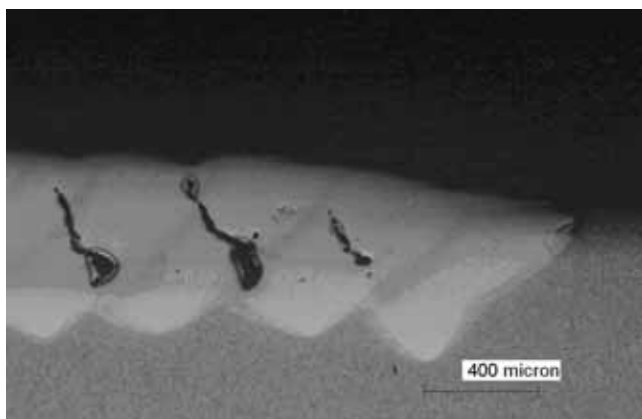
Pri varjenju nitriranih površin se pojavljajo tudi majhne vroče razpoke. Menimo, da se razlogi za nastanek teh razpok ravno pore. Razpoke se začnejo širiti iz por proti temenu zvara. Največkrat ga ne dosežejo. Ta vrsta napak se pokaže šele pri kasnejših obdelavah površine in je varilec med varjenjem ne more zaznati. Razlog za nastanek te vrste napake je izključno izbira neustreznih varilnih parametrov za dupleksno toplotno obdelano površino (prevelik vnos toplote ali prenizka hitrost varjenja).



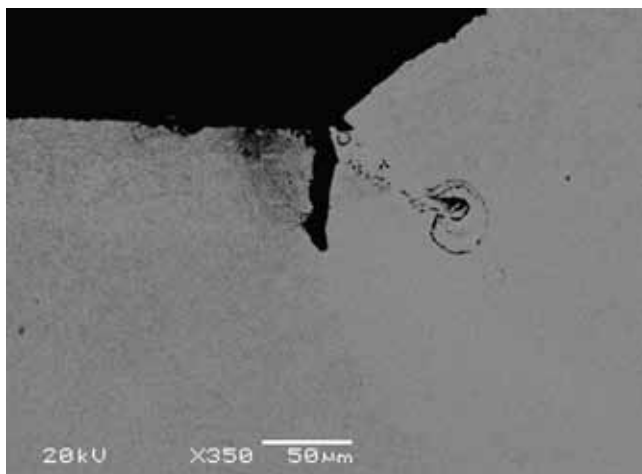
Slika 7: Metalografska slika prečnega laserskega navara nitrirane površine



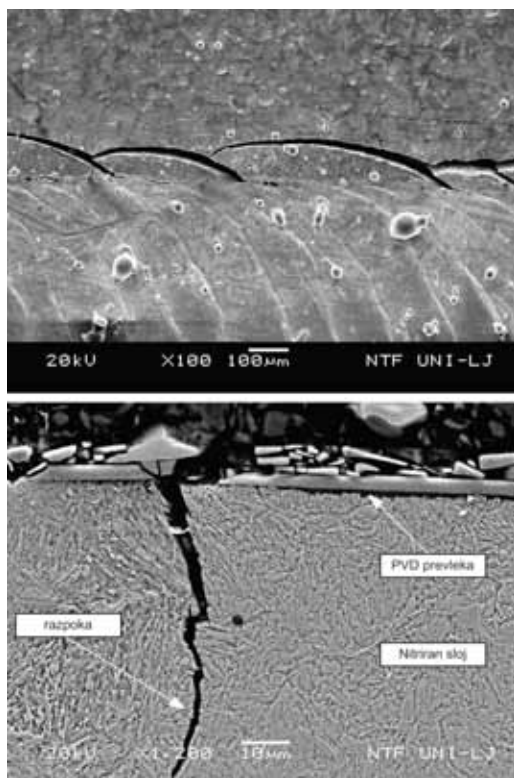
Slika 8: Teme navara na nitrirani osnovi



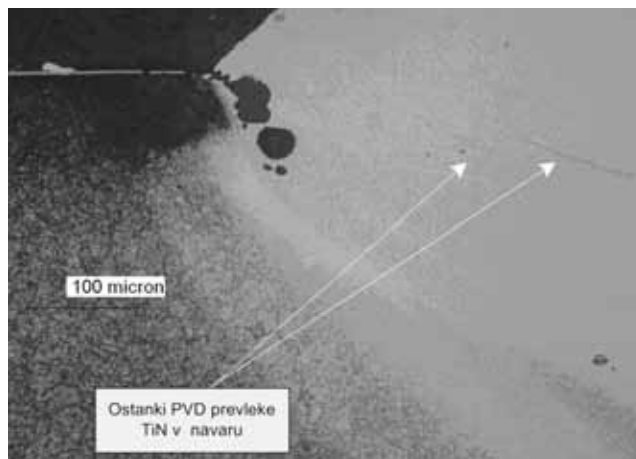
Slika 9: Metalografska slika širjenja razpoke iz pore



Slika 10: Razpoke ob zvarnem robu



Slika 11: Pojav razpok kot posledica neustreznega laserskega varjenja



Slika 12: Ostanki prevleke TiN v zvarnem spoju

Ob zvarnem spoju se pogosto pojavljajo tudi obrobne zajede, ki segajo do globine nitriranega sloja. Zajede so relativno široke in so zaobljenih oblik. Njihov nastanek je povezan z zmanjševanjem volumna taline pri ohlajanju zvarnega spoja.

Pri laserskem varjenju dupleksno toplotno obdelanih površin se pogosto pojavljajo vzdolžne in prečne razpoke. Nastajajo zaradi prevelikih nateznih in tlačnih napetosti med različnimi strukturami, ki imajo različne module elastičnosti in termične koeficiente.

Če je teh razpok veliko, obstaja verjetnost, da se po zelo kratkem času začnejo združevati. Pojavi se nevarnost hitrega luščenja površine, kar posledično pripelje do nesprejemljivih napak pri končnih izdelkih. Taka orodja je treba izločiti iz proizvodnje in ponovno popraviti.

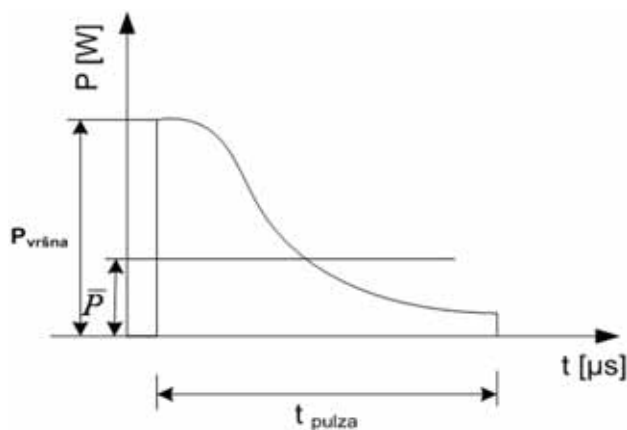
Vključki PVD-prevleke v zvarnem spoju se pojavljajo na orodjih, zaščitene s TiN. Sami vključki ne delajo težav, zaradi oblikovnih zahtev pa je treba njihovo prisotnost zmanjšati, saj povečujejo obrabo obdelovalnega orodja.

5 ANALIZA VPLIVNIH PARAMETROV NA KVALITETO LASERSKEGA NAVARA

Preučili smo različne parametre (trajanje pulza, moč pulza, frekvenca pulzov, premer žarka, hitrost varjenja, način varjenja, vrste dodatnega materiala), ki odločilno vplivajo na kvaliteto navarjenega sloja. Na podlagi serije eksperimentov smo prišli do naslednjih dognanj.

5.1 Oblika laserskega pulza

Opazili smo, da se povečanje poroznosti navarov pojavi pri navarjanju z večjimi močmi. Navari s padajočo obliko pulza imajo manjšo stopnjo poroznosti kot klasični pulzi pravokotnih oblik. Pulz s padajočo karakteristiko preprečuje hiter kolaps



Slika 13: Padajoča oblika laserskega pulza

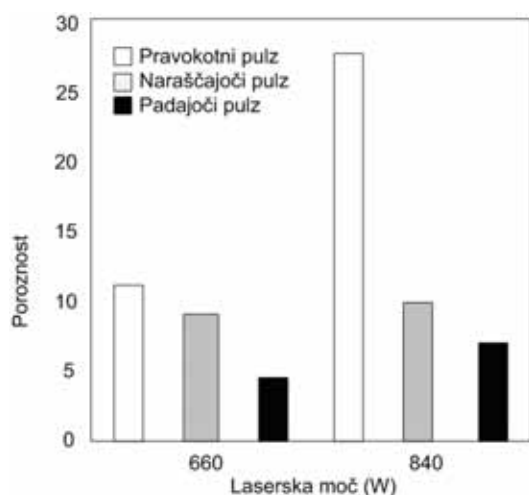
ključavnične luknje, saj s svojo obliko vpliva na počasno ohlajanje taline ter s tem daje raztopljenemu dušiku več časa, da zapusti talino.

Tako smo ugotovili, da postopno zmanjševanje moči pulza, kot je shematsko prikazano na sliki 13, znižuje stopnjo poroznosti v navarjenem sloju. Na povečanje vsebnosti plinskih vključkov v navarjenem sloju pa odločilno vpliva tudi previsoka energija laserskega pulza (slika 14).

5.2 Hitrost varjenja

Hitrost varjenja močno vpliva na vnos toplote in posledično na višino deformacij okolice navara. Pri premajhnih hitrostih varjenja se v navaru pojavljajo razpoke, ki so posledica strjevanja taline. Prav tako smo opazili povečano stopnjo razpok na dupleksno obdelanih površinah tik ob zvarnem robu.

Hitrost ročnega laserskega varjenja je odvisna od izkušenosti operaterja, saj mora ta določiti ustrezna razmerja med zmožnostjo dovajanja žice, frekvenco in ustrezno stopnjo prekrivanja pulzov.

Slika 14: Grafični prikaz poroznosti v odvisnosti od oblike pulza ⁽⁶⁾

5.3 Lasersko pretaljevanje površine

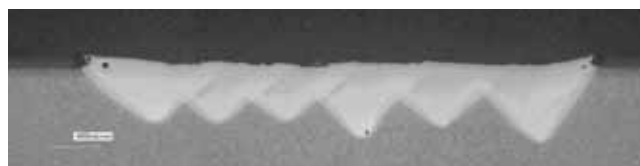
S predhodnim pretaljevanjem površine mesta varjenja se zmanjša poroznost v navarjenem sloju. Samo zmanjšanje poroznosti pri zahtevnejših orodjih ne zagotavlja ustrezne kvalitete površine.

Na sliki 15 je prikazano predhodno pretaljevanje površine nitriranega sloja. Opazimo lahko, da s pretaljevanjem popolnoma odstranimo nitrirano plast. Nekaj poroznosti, ki nastaja kot posledica raztapljanja nitrirane plasti, se pojavi le na začetku in na koncu pretaljene cone. Pričakovali smo, da bo navarjeni sloj na tako pripravljeni površini brez večjih napak.

Izkazalo se je, da to ni tako. Razloge za takšno stanje lahko iščemo v močnem brizganju taline pri dupleksno obdelanih površinah. Ob taljenju nitrirane plasti se začne raztopljeni dušik sproščati v obliki plina, kar povzroča brizganje taline iz cone taljenja.

Material obrizgov vsebuje visoko stopnjo nitridov in ostankov raztopljene prevleke. Če kasneje varimo tako površino, se ti nitridi ponovno raztapljajo in povzročijo napake v navaru. Tako lahko z načinom varjenja B pričakujemo ustrezno kvaliteto navara šele v drugem sloju.

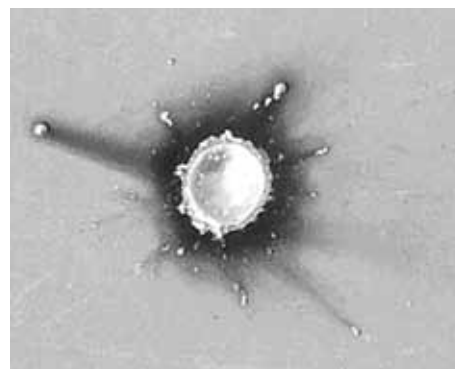
Zato smo razvili inovativen sistem navarjanja dupleksno obdelanih površin. Z novim postopkom



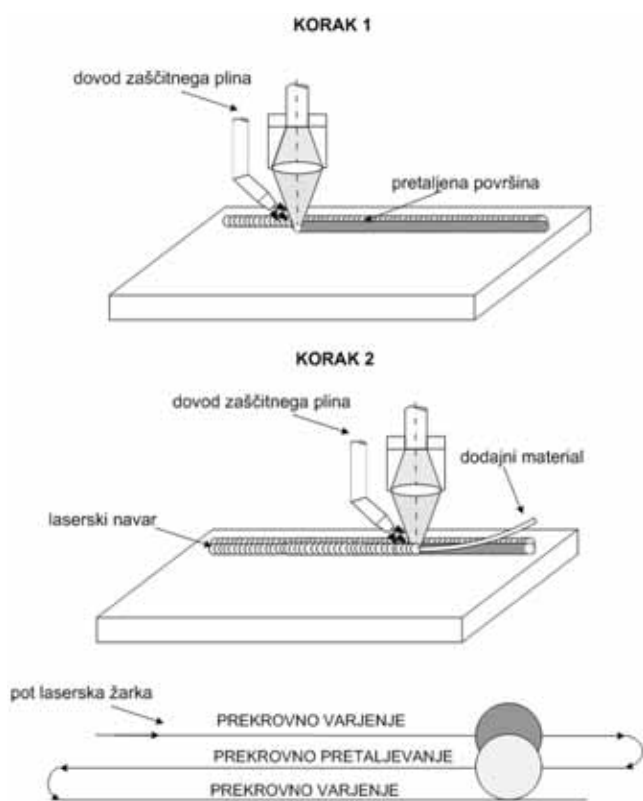
Slika 15: Predhodno pretaljevanje nitrirane površine



Slika 16: Dvoslojni navar na predhodno pretaljeni nitrirani površini



Slika 17: Brizganje taline pri varjenju orodja z visoko vsebnostjo nitridov

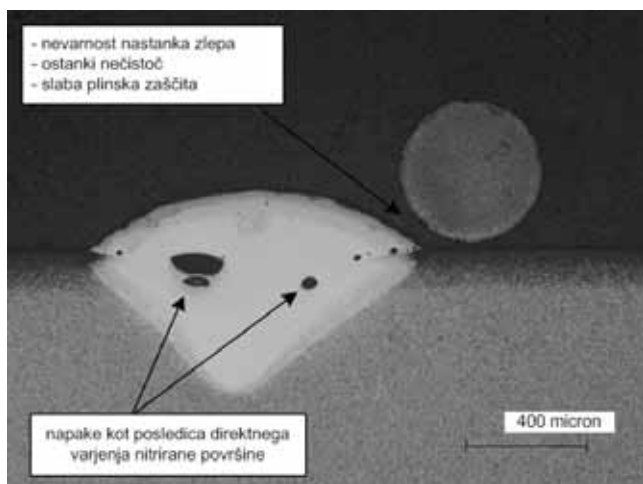


Slika 18: Optimiziran postopek varjenja površinsko duplexno obdelanih jekel

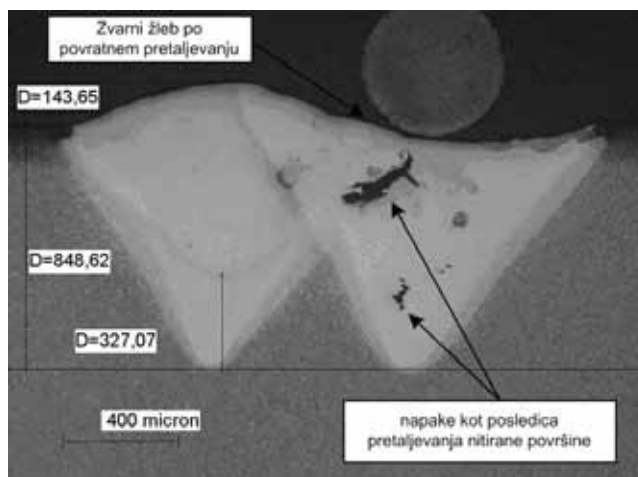
smo poroznost popolnoma odpravili. Zmanjšali smo čase varjenja in odpravili napake v laserskem navaru (zlepe, vključke).

Z novim načinom laserskega varjenja tako ohranjamo ozek pas površine navarjanja ves čas čist (brez obrizgov).

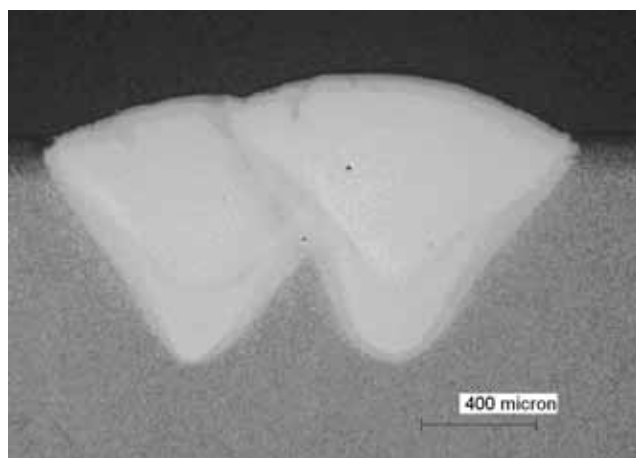
S sprotnim pretaljevanjem tako dosežemo stabilnejši prehod dodatnega materiala v navar. Z izboljšano obliko zvarnega žleba smo omogočili tudi izhod nečistoč z mesta varjenja. Predvsem pa smo zmanjšali turbulentnost dotoka zaščitnega plina na mesto



Slika 19: Prikaz direktnega varjenja brez pretaljevanja



Slika 20: Prikaz laserskega varjenja s povratnim pretaljevanjem



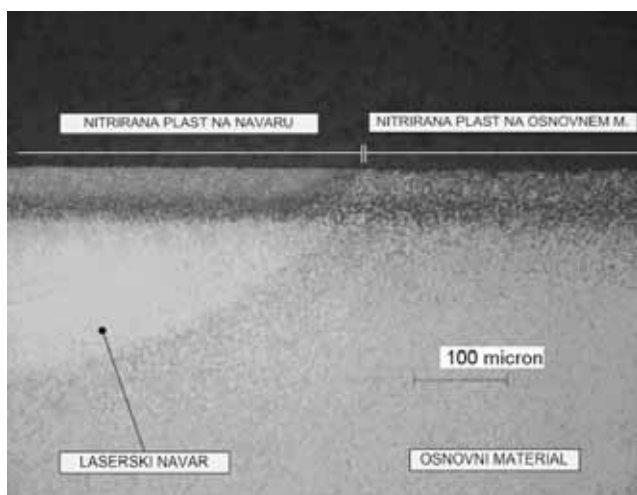
Slika 21: Metalografska slika kakovostnega laserskega navara na nitrirani površini

varjenja, kar posledično pomeni zmanjšano nevarnost onesnaženja navara zaradi atmosferskih vplivov.

6 MEHANSKA IN TERMIČNA OBDELAVA VARJENIH MEST ORODJA

Po uspešnem laserskem reparaturnem navarjanju sledi mehanska obdelava saniranega mesta orodja. Ta vključuje rezkanje, potopno erozijo ter končno poliranje. Želja orodjarjev je, da se orodju predvidena trajnostna doba po tako opravljeni reparaturi poveča vsaj za polovico. To lahko dosežemo z lokalnim nitriranjem (uporaba inhibitorja) oz. z nanosom prevlek na mesta, ki so bila sanirana.

Pri ponovnem nitriranju pa se izkaže za zelo pomembno ustrezna izbira dodatnega materiala v obliki laserske žice, saj sestava dodatnega materiala vpliva na proces tvorbe nitridnih plasti. Odločilno je to, da lahko izvajalec laserskega varjenja ob kroničnem pomanjkanju laserskega dodatnega materiala na svetovnem trgu samostojno izdelava istoimenski



Slika 22: Metalografski prikaz lokalnega plazemskega nitriranja navarjene površine orodja

dodajni material in s tem posledično izdelava homogeno strukturo orodja.

7 SKLEP

S podaljševanjem predvidene trajnostne dobe orodij za tlačno litje se zmanjšujejo proizvodni stroški

podjetja. Ob uporabi dupleksnih postopkov površinske zaščite se lahko zagotovljena trajnostna doba poveča tudi za 200–300 %⁽⁷⁾. Čeprav dodatne površinske zaščite orodij povzročijo zmanjšano varivost, lahko z obvladovanjem tehnologije laserskega reparaturnega varjenja uspešno saniramo poškodovane površine še dolgo po izteku predvidene dobe. Prepričani smo, da se bo povpraševanje po tovrstnih storitvah v prihodnosti povečalo, saj na trg prodira vse več tako toplotno obdelanih površin orodij.

LITERATURA

- ¹<http://www.tamcelik.com/eng/Tamcelik-isil-islem-oksidasyon-islemi.asp>
- ²Panjan P., Čekada M.: Zaščita orodij s trdimi PVD-prevlekami, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, 2005
- ³Pellizzari M., Molinari A., Straffelini G., Surface & Coatings Technology 142–144 (2001), 1109–1115
- ⁴Svelto O.: Principles of lasers; Plenum Press, NY, 1982
- ⁵Tušek J., Pompe K., IRT 3000, 1 (4) (2006)
- ⁶H. B. Kim, C. H. Lee, Science and Technology of Welding and Joining 4 (1999), 51–57
- ⁷Navinšek B., Panjan P., Urankar I., Cvahte P., Gorenjak F., Surface & Coatings Technology 142–144 (2001), 1148–1154