

» Dodatni materijali za lasersko zavarivanje

**Klemen Pompe
Janez Tušek**

Članak predstavlja stanje na području dodatnih materijala za lasersko pulsno zavarivanje i njihov kratak pregled. Opisani su dodatni materijali za pojedine materijale za zavarivanje odnosno smjernice za njihov izbor. Detaljnije su predstavljeni dodatni materijali, primjenjivani u alatničarstvu, jer tu može doći do većih razmimoilaženja od očekivanja i stvarnih svojstava zavara. Opisane su i poteškoće te rješenja kod navarivanja nitriranih površina.

Lasersko pulsno zavarivanje je u alatničarskoj industriji postalo neizostavno, jer zbog svojih prednosti skraćuje vrijeme popravka alata. Pored toga, nudi i niz drugih prednosti pred lučnim postupcima, kao što su primjerice: točnost, mali utjecaj topline, nema potrebe za toplinskim obradama, minijaturnost zavara, nema obojenosti, manje su deformacije ili ih uopće nema, nema kratera na zavarima itd. U nastavku ćemo primjenjivati samo pojam lasersko zavarivanje, no u ovom slučaju uvijek će se odnositi na lasersko pulsno zavarivanje.

Za lasersko zavarivanje pretežno se primjenjuju žice za zavarivanje promjera 0,3 mm do 0,7 mm. U želji za brzim navarivanjem, sve više se primjenjuju i žice za zavarivanje većih promjera, do 1 mm. Lasersko pulsno zavarivanje s takvim promjerima žica uzrokuje velike oscilacije tvrdoće po presjeku zavara, kada je riječ o alatnim čelicima. Prema potrebi se primjenjuju i tanje žice za zavarivanje, i to promjera 0,1 mm ili manje. Žice za zavarivanje za lasersko zavarivanje uglavnom su stanjene postupkom vučenja, a kako je riječ o alatnim čelicima, brzine vučenja su male, a uz to se žica tijekom vučenja zbog deformacija očvršćuje. Tijekom postupka vučenja, žice je potrebno više puta žariti na meko, to bitno utječe na cijenu žice. Stoga kilogram žice za lasersko zavarivanje može koštati i 1.000 puta više od kilograma žice za zavarivanje lučnim postupcima.

Opis problema

U alatničarstvu postoji više razloga za popravak alata: promjena geometrije, oštećenja tijekom serije, trošenje alata itd.

Većina alata, koje se laserski navaruje, već je toplinski obrađena. Dakle alati su kaljeni i popušteni na određenu tvrdoću, ovisno o namjeni alata. Zavar bi u osnovi trebao imati svojstva slična onima koje ima pripremak za navarivanje. Znači li to, da je najbolje da navarujemo s dodatnim materijalom jednakog kemijskog sastava? Ne! Nakon navarivanja naime alate ne smijemo iznova popuštat, barem ne na takvu temperaturu, na kojoj bi zavaru smanjili tvrdoću. Stoga se dodatni materijali u alatničarstvu biraju prije svega obzirom na tvrdoću zavara. Naravno da je pri izboru potrebno biti pažljiv i zbog specifičnih svojstava, kao što su primjerice:

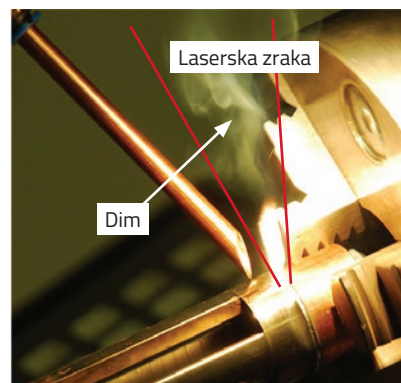
- korozijska postojanost navara (primjer materijal Wr. Nr. 1.2083),
- povećana otpornost na trošenje,
- materijali za precipitacijsko otvrdnjavanje itd.

A alati nisu samo kaljeni, već više puta mogu biti i toplinski obrađeni s različitim postupcima nitriranja (solna kupka, plinsko nitriranje, plazmeno nitriranje), ili s nanošenjem različitih PVD-prevlaka (titan nitrid itd.). Popravci nitriranih alata zahtijevaju dodatnu pripremu površina prije navarivanja.

Svakako se lasersko zavarivanje ne primjenjuje samo u alatničarstvu, već i na brojnim drugim područjima, gdje su važna druga svojstva, kao primjerice: otpornost zavara na visoke temperature, postojanost zavara pri niskim temperaturama, otpornost zavara na različite kemijske utjecaje, itd.

Uređaji za lasersko zavarivanje idu u korak s vremenom i stoga su iz godine u godinu bolji. Međutim to ne možemo reći za dodatne materijale. Uz to, razvoj dodatnih materijala za lasersko zavarivanje praktički nikada nije postojao. Za zavarivanje se uglavnom primjenjuju samo stanjene žice za zavarivanje za postupke MIG/MAG, a ponekad i za postupak TIG. Između lučnih postupaka zavarivanja i laserskog pulsno zavarivanja ima mnogo razlika. Najvažnija je brzina hlađenja. Kod laserskog zavarivanja je, zbog male mase taljevine i neusporedivo veće mase, ona iznimno velika. A to naravno utječe na svojstva zavara. Nerijetko se dogodi, da se tvrdoća zavara, navedena za MIG/MAG postupak ili TIG postupak, bitno razlikuje od onih, koje zavari ima nakon laserskog zavarivanja. Zbog razlika u procesu zavarivanja, dolazi i do različitog gorenja kemijskih elemenata.

Na slici 1 vidimo dim, koji nastaje pri laserskom zavarivanju. Dim sastavljaju dimni plinovi i izgorjeli elementi. Koliki udio pojedinih elemenata izgori, nije poznati, no koliko god, toliko ih je manje u zavaru. Udio izgorjelih elemenata nedvojbeno ovisi o parametrima laserske zrake, a ovisi i o vrsti osnovnog i dodatnog materijala.



» Slika 1: Dim kod laserskog zavarivanja



Klemen Pompe, Janez Tušek

▪ TKC, d. o. o., Trnovska ulica 8, 1000 Ljubljana, Slovenija

		% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% Ti	% W	% V	% Fe
O.M.	1.2343	0.37	1.00	0.38	5.15	1.30	/	/	/	ostalo
D.M.	G2	0.35	0.30	1.20	7.00	2.00	0.3	/	/	ostalo
D.M.	G3	0.25	0.50	0.70	5.00	4.00	0.6	/	/	ostalo
D.M.	G4	0.10	0.40	0.60	6.50	3.30	/	/	/	ostalo
D.M.	C301	0.30	0.25	0.30	2.30	/	/	4,30	0.60	ostalo

O.M. – osnovni materijal

D.M. – dodatni materijal

» Tablica 1: Kemijski sastav osnovnog i dodatnih materijala za rad u vrućem.

[1, 2, 3]

Primjena dodatnih materijala u alatničarstvu

Zavarivanje alata za rad u vrućem

Ukoliko se usredotočimo na najčešće alate, a to su alati za tlačno lijevanje aluminija i alati za injekcijsko prešanje polimera, govorimo o tvrdoćama između 46 HRC i 52 HRC. Pretežito se ovdje primjenjuje čelik na bazi kroma Wr. Nr. 1.2343 (Ravne UTPO Mo1, AISI H11, DIN X38CrMoV5-1) [1]. Nakon kaljenja materijal postiže oko 56 do 57 HRC, a za potrebe plastičarske industrije popušta ga se na 52 HRC, dok ga je za tlačno lijevanje potrebna veća žilavost, pa ga se stoga popušta na 46 do 48 HRC.

U tablici su prikazani neki dodatni materijali poznatih proizvođača, čiji navari postižu različite tvrdoće. U osnovi su namijenjeni za navarivanje alata za rad u vrućem.

DODATNI MATERIJAL	LUČNI POSTUPCI [HRC]	LASERSKO NAVARIVANJE [HRC]
G2	53 - 58	56 - 57
G3	42 - 46	31 - 33
G4	38 - 42	45
C301	45	52

» Tablica 2: Tvrdoće navara nakon različitih postupaka navarivanja. [4]

Tvrdoće navara koje dobivamo s pomoću lučnih postupaka i s laserskim navarivanjem, prikazane su u tablici 2.

Brzo možemo primijeniti, da usporedba tvrdoća navara najviše odstupa kod dodatnog materijala oznake G3. Postignuta tvrdoća

MOTOMAN GP4

Neuhvatljivo brz ustrajno precizan



Polumjer dohvata: 550 mm

Nosivost: 4 kg

Ponovljiva točnost: ±0.01 mm

Zaštita: IP67

YASKAWA

pri laserskom navarivanju je naime bitno niža od očekivane i navedene u katalogu proizvođača. Tvrdoće koje navodi proizvođač naravno se odnose samo na lučne postupke navarivanja. Kod materijala oznake G4 tvrdoća laserskog navarivanja je viša od očekivane. Naravno da na postignute tvrdoće djelomično utječu i parametri navarivanja. Kod lučnih postupaka na tvrdoću navara najviše utječe temperatura predgrijavanja. I kod laserskog navarivanja s promjenom parametara možemo postići bitno viša ali i bitno niže tvrdoće od navedenih u katalogima. U određenim slučajevima razlika može iznositi čak 14 HRC!

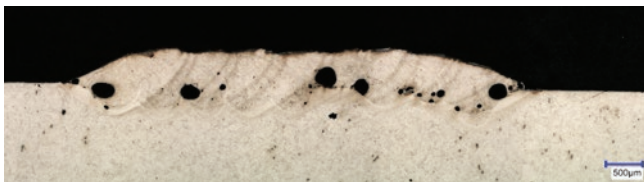
	% C	% SI	% MN	% CR	% MO	% V	% W	% FE
1.2379	1.53	0.35	0.40	12.0.	1.0.	0.8.	/	ost.
45351	0.40	3.00	0.50	9.00	/	/	/	ost.
Calmax	0.59	0.35	0.80	4.50	0.50	0.25	/	ost.
A673	0.35	1.0	0.4	5.0	1.5	0.3	1.3	ost.

» Tablica 3: Kemijski sastav osnovnog i dodatnih materijala za rad u hladnom.. [2, 3, 5]

Zavarivanje alata za rad u hladnom

Tipični predstavnici alata za rad u hladnom su prije svega rezni alati i alati za preoblikovanje. Alati moraju biti tvrdi i otporni na trošenje. To znači, da čelici moraju biti visoko legirani, s visokim udjelom ugljika kao i drugih legiranih elemenata, što pogoršava zavarljivost. S postupkom metalurgije praha, izrađuju se visoko legirani čelici, koje inače postupcima kontinuiranom lijevanja nije moguće izraditi. Zavarivanje takvih materijala posebno je otežano.

Za alate za rad u hladnom često se primjenjuje materijal Wr. Nr. 1.2379 (Ravne OCR12VM, AISI D2, DIN X155CrVMo12-1). Kemijski sastav tog materijala i primjerenih dodatnih materijala za zavarivanje je prikazan u tablici 3.



» Slika 2: Laserski navar na nitriranoj površini s uobičajenom žicom za zavarivanje za taj materijal. [6]

Mjerenja tvrdoća laserskih navara u jednom slučaju pokazuju veliko odstupanje od navedenih tvrdoća u katalogu proizvođača, koje naravno vrijede za lučne postupke.

Zavarivanje nitriranih površina

Alate se prema potrebi i nitriraju, obično zbog bolje otpornosti na trošenje, lakšeg izbacivanja proizvoda iz kalupne šupljine i poboljšavanja postojanosti na koroziju. Navarivanje nitriranih površina je posebno zahtjevno i to vrijedi kako za lučne postupke

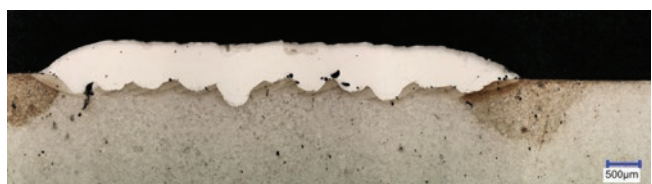
DODATNI MATERIJAL	LUČNI POSTUPCI [HRC]	LASERSKO NAVARIVANJE [HRC]
45351	60	~ 60
Calmax	58 – 61	~ 42
A673	53 – 58	~ 58

» Tablica 4: Tvrdoće navara različitih postupaka navarivanja. [4]

navarivanja, tako i za lasersko navarivanje. Poteškoće uzrokuju nitridi, koji se tijekom navarivanja, dakle pri visokim temperaturama, raspadaju. Dušik, koji se pri tome oslobađa, ostaje zarobljen u navaru i tako uzrokuje poroznost navara. A to se vrlo dobro vidi na slici 2.

Jedan od načina zavarivanja nitriranih površina je lasersko pretaljivanje prije zavarivanja. S višestrukim pretaljivanjem omogućujemo dušiku da ispliva iz taljevine na površinu. Tek nakon toga počinjemo sa zavarivanjem s dodatnim materijalom. Međutim, takav postupak uzrokuje bitno veću zonu utjecaja topline (ZUT), a prije svega treba mnogo vremena.

Kako bismo mogli izbjeći nepotrebno pretaljivanje površine, možemo primijeniti dodatni materijal, koji sadrži legirne elemente, koji bi se u zavaru vezali s oslobođenim dušikom i na taj način stvorili nove nitride. Takvi elementi su primjerice titan, krom i aluminij. Primjer navara sa žicom za zavarivanje sa sadržajem 1.6 % Ti i 0.1 % Al prikazan je na slici 3.

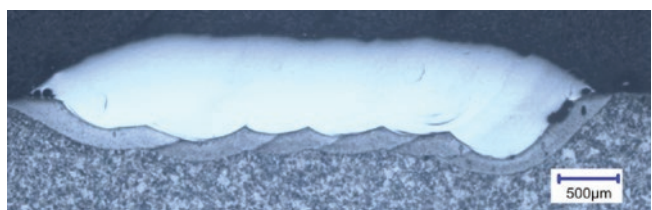


» Slika 3: Navar načinjen sa žicom za zavarivanje sa sadržajem Ti i Al. [6]

Usporedba slika 2 i 3 pokazuje, da je u slučaju s titanom i aluminijem legirane žice, u navaru bitno manje pora.

Zbog opisanih problema pri zavarivanju nitriranih površina i zbog nedostatka primjerene žice, za zavarivanje nitriranih površina smo sami razvili dodatni materijal, koji omogućuje izradu kvalitetnih zavara.

Prototipna žica za zavarivanje tvrtke TKC d.o.o., dala je najbolje rezultate, koji su prikazani na slici 4. Osim pri završetku zavara, zavar je potpuno bez pora. To znači, da je žica za zavarivanje primjerena za zavarivanje nitriranih površina bez pretaljivanja. Popravak zavara s pretaljivanjem i dodatnim zavarom potreban je samo na završetku zavara.



» Slika 4: Zavar na nitriranoj površini, izrađen s prototipnom žicom tvrtke TKC d.o.o. [6]

Žica za zavarivanje ima povećani sadržaj titana, koji tijekom zavarivanja na sebe veže dušik. Nastali titanovi nitridi (TiN) su kemijski stabilni i imaju talište pri 2950 °C.

Zavarivanje maraging čelika

Alatni čelici, koji precipitacijski očvršćuju, mogu biti prije očvršćivanja obrađeni na konačne dimenzije, jer su temperature starenja niže od temperatura, koje uzrokuju dilatacijske promjene. Primjenom primjerenih dodatnih materijala, takvi čelici se mogu lijepo zavarivati. Postignute tvrdoće zavara su oko 36 HRC. Već očvršćeni čelik nije dobro ponovo starati pri jednakoj temperaturi, jer mu se time smanjuje žilavost. Ukoliko je tvrdoća na alatu važna, možemo primijeniti i druge žice za zavarivanje, onakve, kao za čelike za rad u vrućem.

Navarivanje površina otpornih na trošenje

Lasersko zavarivanje primjereno je i za navarivanje površina otpornih na trošenje. Pri tome možemo primijeniti različite žice za zavarivanje. Koji dodatni materijal izabrati, ovisi o vrsti primjene. Za navarivanje slojeva otpornih na trošenje, obično se izaberu dodatni materijali s većim postotkom ugljika i elementi koji su dobri tvorci karbida. To su prije svega volfram, molibden, krom pa i vanadij. S laserom se, uz odgovarajuće uvjete, mogu zavarivati i brzorezni čelici. A s njima možemo navarivati i druge materijale i na taj način povećati otpornost na trošenje. Navarivanje površina otpornih na trošenje s laserom može se primjenjivati:

- na alatima za tlačno lijevanje aluminijskih, gdje taljeva s visokom brzinom i visokom temperaturom uzrokuje abraziju na određenim mjestima na alatu,
- na uljevcima alata,
- na alatima za injekcijsko prešanje plastike s dodatkom staklenih vlakana,
- na alatima za lijevanje bakelita itd.

Dodatni materijali za nehrđajuće čelike, obojene metale i druge egzotičnije materijale

Nehrđajući čelici

Lasersko zavarivanje nehrđajućih čelika načelno nije problematično, što posebno vrijedi za austenitne nehrđajuće čelike. Kod martenzitnih nehrđajućih čelika može doći do pucanja zavora, a to se može riješiti primjenom primjerenim oblika laserskih pulsova. Nehrđajući čelici s povećanim sadržajem sumpora (zbog lakše obradivosti) imaju lošiju zavarljivost i kod drugih postupaka zavarivanja.

Kod zavarivanja nehrđajućih čelika potrebno je imati jednaki dodatni materijal, kako bi se očuvala svojstva materijala (kemijska otpornost, otpornost na temperaturu itd.).

Lasersko zavarivanje austenitnih nikal-krom čelika, nazvanih i superlegurama, bolje poznatih pod trgovačkim nazivom Inconel, ne predstavlja problem. Važno je samo, da je dodatni materijal primjerenog kemijskog sastava, kako bi zavar zadržao svojstva, kakva ima pripremak za zavarivanje.



» Slika 5: Laserski zavar dvaju različitih materijala AISi10Mg(Fe) i AlMgSi_{0,5} legure [Foto: TKC d.o.o.]

Obojeni metali

Od obojenih metala, laserski se najviše zavaruje aluminij. Legure aluminijske s silicijem imaju bolju zavarljivost od legura aluminijske s magnezijem. Iako je zavarivanje AlMg legura problematično sa

stajališta sklonosti zavora napuklinama, i zavarivanje AlSi legura nije potpuno jednostavno. Probleme s napuklinama možemo izbjeći prije svega s primjerenim čišćenjem oksida tik prije zavarivanja. To vrijedi za pripreme za zavarivanje kao i za žicu za zavarivanje. Na kvalitetu zavora snažan utjecaj ima i oblik laserskog pulsa, koji može spriječiti moguće napukline.

Na slici 5 je prikazan laserski zavar bez napuklina i bez pora. Vidljiva je samo greška u osnovnom materijalu. Bez primjerenog oblika laserskog pulsa takav zavar nije bilo moguće načiniti.

Lasersko zavarivanje bakra nije baš često, barem ne ono s davanjem materijala. Međutim dodatni materijal može u velikoj većini biti čisti bakar.

No češće se zavaruju legure bakra i aluminijske. Aluminijske bronze se zavaruju donekle jednostavno, a kao dodatni materijal uzima se slična žica za zavarivanje. Aluminijske bronze s povišenom tvrdoćom bismo čak mogli lagano zavarivati, no problem je u tome, da nema odgovarajućih dodatnih materijala. Na tržištu postoje žice za zavarivanje s jezrgom, koje nisu primjerene za stanjivanje na dimenzije, koje se primjenjuju pri laserskom zavarivanju.

Drugi materijali

Lasersko zavarivanje drugih materijala, kao što su titan, zlato, nikal, nitinol itd., sa stajališta dodatnih materijala ne predstavlja problem. Primjenom jednakih dodatnih materijala, bez problema postizemo kvalitetne zavora. Teže je postići kvalitetne zavora pri laserskom zavarivanju sivog lijeva i zamaka, pri čemu je potrebno primijeniti dodatne materijale drugačijeg sastava.

Zaključak

Kako smo uvodno napisali, dodatni materijali za lasersko zavarivanje uglavnom su izrađeni od žica za zavarivanje za postupke MIG/MAG. Kako je riječ o dva potpuno različita postupka zavarivanja, neodgovorno je od nekih proizvođača dodatnih materijala za lasersko zavarivanje, da u svoje kataloge odnosno opseg žica doslovno prepisuju tekst iz kataloga za MIG/MAG žice. Kod laserskog zavarivanja imamo prilično više utjecaja na tvrdoću zavora nego li kod lučnih postupaka. Postignute brzine hlađenja su pri laserskom zavarivanju neusporedive s onima pri lučnim postupcima. A to može značiti, da su i postignute mikrostrukture drugačije i s time svojstva zavora. I gorenje i isparivanje elemenata su drugačiji nego li kod lučnih postupaka. Kod svojstava zavora moramo uzeti u obzir i to, da različiti materijali imaju različite kemijske sastava, a s time i različita istezanja. To je posebice važno kod zavarenih proizvoda, koji rade pri različitim temperaturama.

Literatura

- [1] UTP: Welding consumables, Katalog dodatnih materijala UTP, Germany, 2009.
- [2] Castolin Eutectic: Produkt und Anwendungs informationen, Stand 09/15 Kriftel, Njemačka, 2015.
- [3] SIJ Metal Ravne, d. o. o.: <https://steelselector.sij.si>. Pristip: 16. 4. 2021.
- [4] TKC, d. o. o.: Vlastita mjerenja u akreditiranom laboratoriju
- [5] Uddeholm: Certifikat 2.1 uz isporuku žica za zavarivanje.
- [6] Rok Lenaršič: Lasersko navarivanje nitriranega orodnega jekla: završni rad Razvojno istraživačkog programa I. stupnja Strojstvo, Sveučilište u Ljubljani, Fakultet za strojarstvo, Ljubljana, 2020.