

Mikrovarjenje s trenjem in mešanjem bakrenih kontaktov

Damjan KLOBČAR, Janez TUŠEK, Milan BIZJAK, Vladka LEŠER

Izvleček: Komponente in deli električnih in elektronskih naprav so izdelane iz električno prevodnega bakra brez vsebnosti kisika (CuOF), iz bakra brez vsebnosti kisika z dodanim fosforjem (CuOFP) ali iz bakra z dodanim srebrom (CuAg 0,02). Spajanje te vrste materialov z uporabo konvencionalnih varilnih postopkov, kot so obločna varjenja, uporovno varjenje ali lasersko varjenje, je težavno zaradi njihove odlične toplotne in električne prevodnosti, nizke električne upornosti ter visoke reflektivnosti (slaba absorpcija energije laserskega žarka, ki se izboljša z uporabo zelene laserske svetlobe). Varivost teh materialov je enostavnejša s postopki varjenja s trenjem, kamor spadajo rotacijsko in linearno varjenje s trenjem, varjenje z ultrazvokom, vibracijsko varjenje in varjenje s trenjem in mešanjem. Prispevek prikazuje mikrovarjenje s trenjem in mešanjem (μ FSW) bakrenih kontaktov z različno oblikovanimi zvarnimi spoji. Analizirani so bili vplivi oblike orodja, varilnih parametrov in vnosa energije na metalurške in mehanske lastnosti ter pojav napak v zvaru. Okarakterizirali smo napake zvarnega spoja in predstavili vzroke za njihov nastanek ter odpravo. Določeni so optimalni varilni parametri in oblika orodja, ki omogočajo izdelavo trdnega zvarnega spoja brez napak, z lastnostmi maksimalno podobnimi osnovnemu materialu.

Ključne besede: mikrovarjenje s trenjem in mešanjem (μ FSW), Cu ETP, natezni test, mikrostruktura, napake v zvaru

1 Uvod

Komponente in deli električnih in elektronskih naprav so izdelani iz bakra brez vsebnosti kisika (CuOF), elektrolitskega bakra (CuETP), elektronskega bakra brez vsebnosti kisika (CuOFE) ali iz bakra brez vsebnosti kisika z dodanim fosforjem (CuOFP). Lastnosti teh materialov so visoka električna prevodnost, visoka toplotna prevodnost in sposobnost za mehansko utrjevanje ter toplotno obdelavo. Pogosto se pojavijo potrebe po spajanju teh komponent, za kar lahko uporabimo različne tehnologije [1]. Vijačenje in kovičenje se uporablja, če je

Doc. dr. Damjan Klobčar, univ. dipl. inž., prof. dr. Janez Tušek, univ. dipl. inž., oba Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; prof. dr. Milan Bizjak, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta; doc. dr. Vladka Lešer, univ. dipl. inž., Fakulteta za zdravstvene vede, Novo mesto

komponente potrebno razstaviti. Lepljenje uporabimo, ko potrebujemo nižjo trdnost spoja in je sprejemljiva slabša električna in toplotna prevodnost. Mehko ali trdo spajkamo na podlagi vrste spoja in potrebne natezne trdnosti [1]. Talilno varjenje (ročno obločno varjenje, varjenje TIG, varjenje MIG/MAG, plazemsko varjenje, varjenje z elektronskim snopom, lasersko varjenje) uporabimo, ko potrebujemo visoko trdnost in visoko električno prevodnost spoja [2]. V zadnjem času se za spajanje bakra in aluminija razvija predvsem lasersko varjenje z uporabo zelene svetlobe laserskega žarka, ki ima večjo absorpcijo energije laserskega žarka (*slika 1*) [3, 4]. Veliko se vlaga tudi v razvoj laserskih virov, ki kombinirajo laserska žarka dveh valovnih dolžin (IR in zelene), s čimer se v bakru dobi večja pretalitev osnovnega materiala (*slika 2*). Elektroporovno varjenje omogoča varjenje prekrovnih spojev z zmerno trdnostjo, vendar je spajanje težje izvedljivo zaradi visoke električne prevodnosti zvarnega mesta [5, 6]. Ultrazvočno varjenje, vibracijsko varjenje, varjenje s trenjem (linear-

no, rotacijsko, varjenje s trenjem in mešanjem (FSW)) omogočajo dobre lastnosti spoja (električna in toplotna prevodnost, trdnost), zato te procese uporabljamo za visoke serije v ozkih dimenzijskih tolerancah. Difuzijsko varjenje je »relativno« počasno, vendar omogoča dobre lastnosti spoja [7]. Spajanje z valjanjem (roll bonding) je primerno za visokoserijsko proizvodnjo, medtem ko se hladno spajanje s pritiskom uporablja za podaljšanje različnih profilov [1, 8, 9]. Postopki spajanja s preoblikovanjem se lahko uporabijo tudi za spajanje aluminijevih zlitin, kjer ima dobro poznavanje materialnih lastnosti ključen pomen za spajanje [10] in nadaljnjo uporabo [11]. Pri spajanju z valjanjem uporabljamo kakovostna orodna jekla [12, 13] zaradi njihove izpostavljenosti visokim temperaturam.

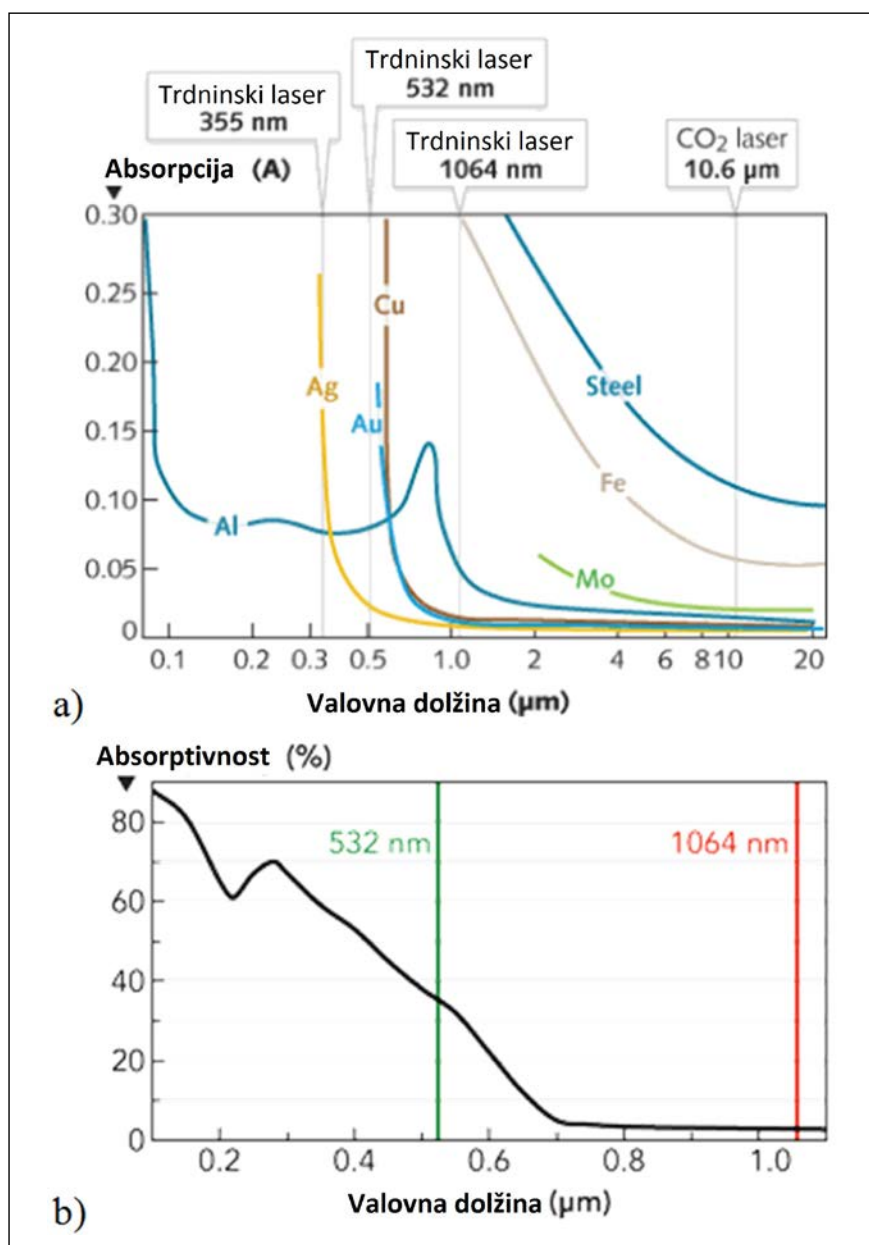
Pri talilnem varjenju lahko pride do neprevarjenosti zaradi visoke toplotne prevodnosti bakra, zato nad 3 mm debel baker varimo s predgrevanjem v zaščiti argona. V toplotno vplivanem območju (TVP) kovanega CuETP lahko pri visokih temperatu-

rah pride do difuzije in migracij oksidov, kar lahko povzroči poroznost v TVP. Zato ga varimo hitro, da omejimo segrevanje. Oksidacijo pri talilnih varjenjih preprečimo z varjenjem v zaščitnem plinu argonu, heliju ali dušiku. Optimalna izbira tehnologije je odvisna od mnogih dejavnikov, predvsem pa od velikosti serije, vrste spojev in zahtevanih lastnosti.

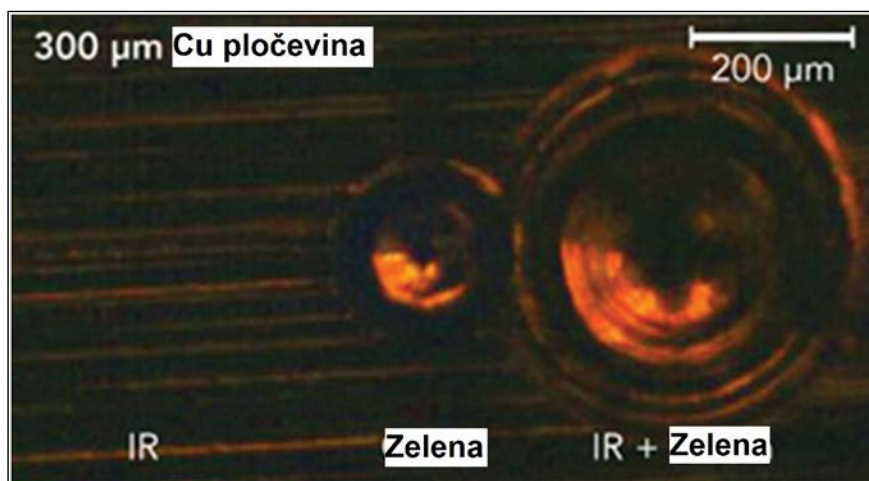
FSW-varjenje bakra zahteva veliko večji vnos toplote v primerjavi z varjenjem aluminijevih zlitin zaradi večjega odvoda toplote [14–16]. Pri manjšem vnosu toplote se pojavijo napake, kot so podolgovati lunkerji (črvine), pri prevelikem vnosu toplote pa se pojavi oksidacija na površini varjenca [15]. FSW-varjenje se je že uspešno uporabilo za varjenje 50 mm debelih bakrenih zabojnikov za shranjevanje radioaktivnih odpadkov [17].

FSW-varjenje bakra CuETP pri temperaturah med 460–530 °C omogoča nastanek dobrih zvarov s trdoto ~70 HV in raztežkom trikrat večjim od osnovnega materiala [18, 19]. Zvare brez napak so dobili tudi pri manjšem vnosu toplote, pri katerem je natezna trdnost zvara dosegla skoraj 100 % osnovnega materiala [20]. Razloženi so bili mehanizmi loma in karakteristike vseh štirih območij. Leal in sod. [21] so dokazali, da so navor, mikrostruktura, trdota in oblikovanje napak v zvaru odvisni predvsem od vrtilne hitrosti orodja ter manj od hitrosti pomika in oblike rame orodja. Analiza obdelave s trenjem in mešanjem (FSP) CuDHP je pokazala, da na velikost zrn in na mehanske lastnosti območja mešanja vplivajo geometrija orodja, procesni parametri in toplotni tok. Zrna se večajo z zmanjšanjem hitrosti pomika in zvečanjem vrtilne hitrosti [22].

Prispevek predstavlja analizo μ FSW-varjenja CuETP v prekrovnem in sočelnem spoju. Raziskava proučuje vpliv oblike orodij in varilnih parametrov na oblikovanje zvarnega spoja. Rezultati kažejo, da se velikost zrn v območju spoja močno zmanjša v primerjavi z osnovnim materialom, izboljša pa se tudi trdnost spojev.



Slika 1. Absorpcija laserske svetlobe različnih valovnih dolžin v a) različnih kovinah [4] in b) v bakru [3]



Slika 2. Primerjava zvarne točke, narejene z IR-lasersko svetlobo (~1 MW/cm²), zeleno lasersko svetlobo (~1 MW/cm²) in s kombinacijo obeh svetlob (~2 MW/cm²) [3]

■ 2 Eksperimentalni del

Uporabljen je bil standardni baker CuETP (R290 H090) s kemijsko sestavo ³ 99,9 % Cu in 0,005–0,04 % O [23], mejo tečenja ³ 250 MPa in natezno trdnostjo 290–360 MPa. Material je imel električno prevodnost med 57 in 58,5 MS/m, koeficient električne upornosti $3,7 \cdot 10^{-3}/K$ (med 0 in 300 °C) in toplotno prevodnost 390 W/mK [23]. Nekatere proizvodne značilnosti CuETP so navedene v tabeli 1. Iz tabele je jasno razvidna omejena varivost bakra s taljenjem.

Testni vzorci za varjenje so bili dimenzij 110 ´ 20 ´ 2 mm. Izdelani so bili sočelni zvarni spoji (slika 3a in b) in prekrhovni zvarni spoji (slika 3c).

mFSW-varjenje smo opravljali na univerzalnem frezalnem stroju. Orodja za varjenje so bila narejena iz orodnega jekla (X38CrMoV5-1 (DIN W.Nr. 1.2343)) poboljšane na 45 HRC. Oblika rame pri orodjih je bila konkavne oblike (5°) (slika 4). Premer orodij B in C je bil 6 mm, orodij A in D pa 4 mm. Orodje A je imelo koničen čep z večjim premerom 2,5 mm in dolžino 1,8 mm. Orodji B in C sta imeli piramidno oblikovan čep z daljšima stranicama 3 ´ 3 mm in dolžino 1,8 mm. Čep orodja D je bil kvadrast 1,2 ´ 1,2 mm in dolžine 1,5 mm. Orodje se je vrtelo v smeri urnega kazalca in se je gibalo po sre-

Tabela 1. Proizvodne značilnosti Cu ETP [23]

Lastnosti izdelave	
Sposobnost za delo v hladnem	odlično
Obdelovalnost	manj primerno
Sposobnost galvaniziranja	odlično
Sposobnost vročega nanosa kositra	odlično
Mehko spajkanje	odlično
Uporovno varjenje	manj primerno
MIG/MAG-varjenje	manj primerno
Lasersko varjenje	manj primerno

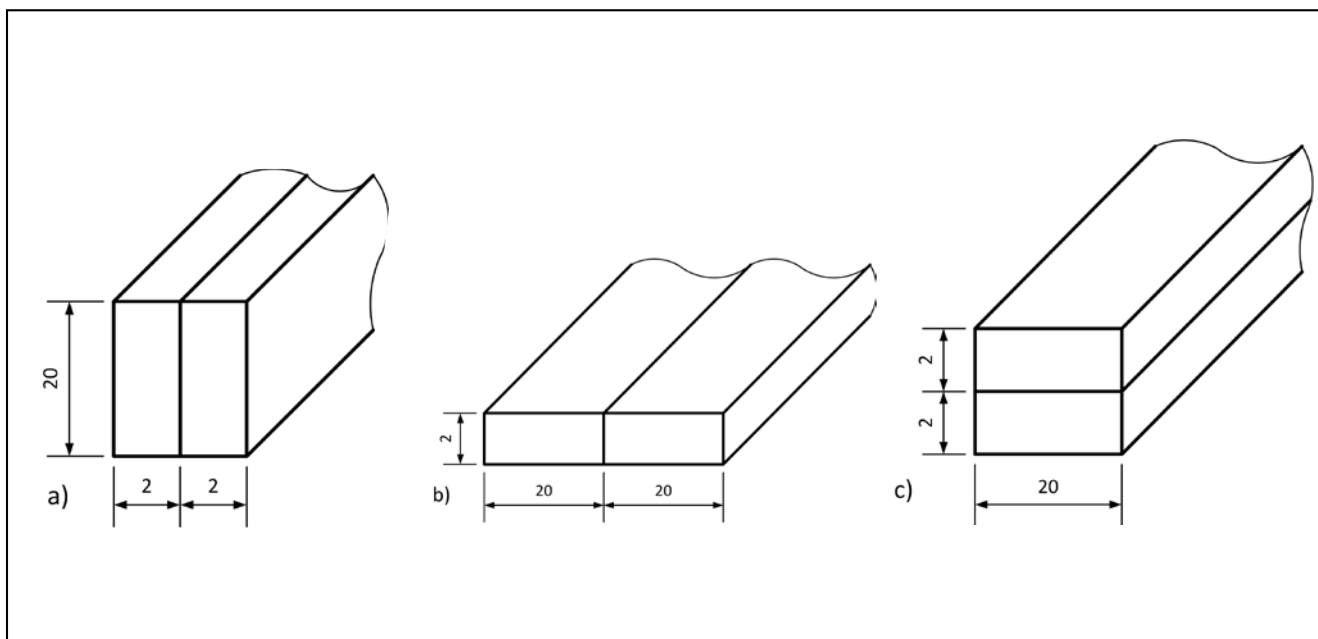
dini testnih vzorcev. Eksperimenti so bili narejeni pri hitrosti vrtenja orodja (w) med 600 in 1.900 obr/min, hitrosti varjenja (v) med 14 in 93 mm/min in nagibu orodij med 3° in 5°.

Površina zvara je bila vizualno pregledana. Iz zvarov so bili odrezani vzorci za analizo mikrostrukture in natezne trdnosti. Pripravljeni vzorci za analizo makro- in mikrostrukture so bili jedkani v raztopini FeCl₃ in pregledani z optičnim mikroskopom in digitalno kamero za zajem slik.

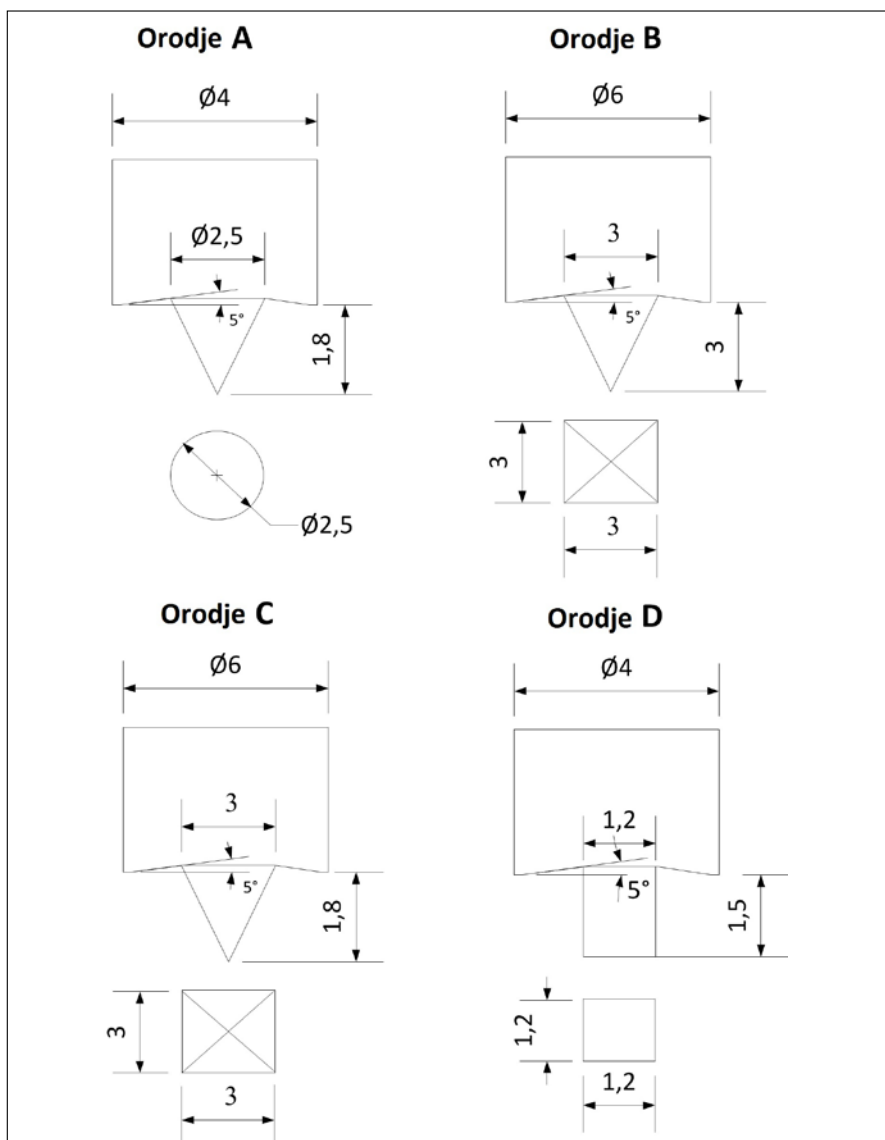
Vnos toplote je bil določen s faktorjem rotacije glede na podajanje (RPF = w/v), ki predstavlja poenostavljen indeks vnosa toplote.

■ 3 Rezultati

Slika 5 prikazuje makroobrase varov na sočelnih zvarih z uporabo orodja A. Varjenje je potekalo pri hitrosti pomikanja 37 mm/min, s 3° nagibom orodja in z različnimi RPF-vnosi toplote. Vizualni pregled prerezanih površin prikazuje dober videz zvarnega spoja (slika 5a). Makrobrusi na sliki 5b–d so pokazali, da se podolgovati lunkerji oblikujejo na napredujoči strani (AS) orodja. Podolgovat lunker ali črvina je tipična napaka FSW-varjenja. Nastanejo zaradi premajhnega vnosa toplote in v primeru bakra tudi z visoko toplotno prevodnostjo. S slik (5b–d)



Slika 3. Vzorci za varjenje – sočelna zvarna spoja a) in b), prekrhovni zvarni spoj c)

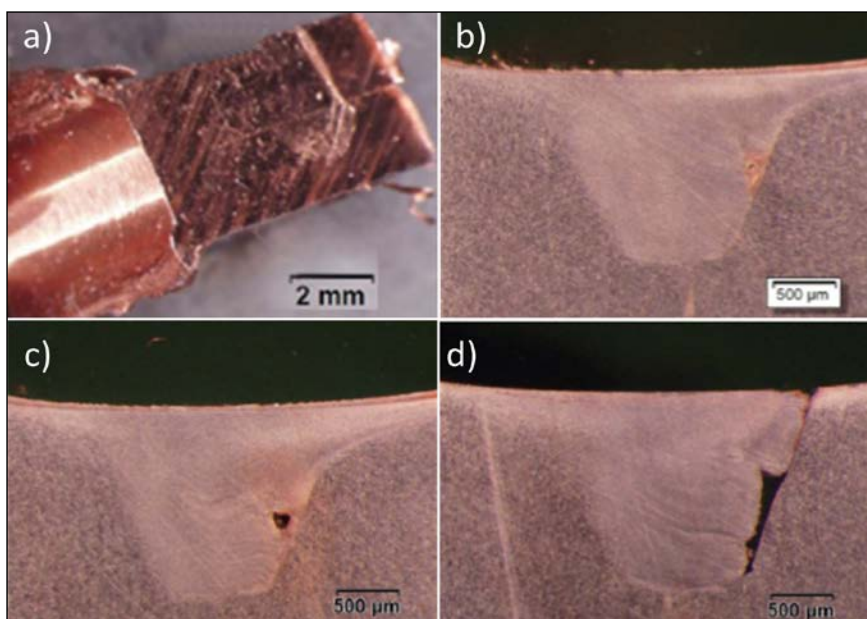


Slika 4. Shematski prikaz μ FSW-orodij

lahko ugotovimo, da se manjši lunckerji pojavijo pri višjem RPF-indeksu. Podolgovat luncker se pojavi na napredujoči strani orodja (AS) zaradi večje razlike med hitrostma (različen varjenec/smer premikanja orodja), čeprav so lahko temperature višje na AS. Napake so se oblikovale zaradi premajhnega vnosa toplote pri orodju z majhnim premerom rame (4 mm), na kateri se ustvari večina toplote zaradi trenja.

Pri naslednji seriji poskusov je bila oblika čepa spremenjena iz stožčaste v piramidno in v obliko bloka. S tem smo želeli povečati vnos toplote na račun večjega mešanja materiala pri enakih varilnih parametrih.

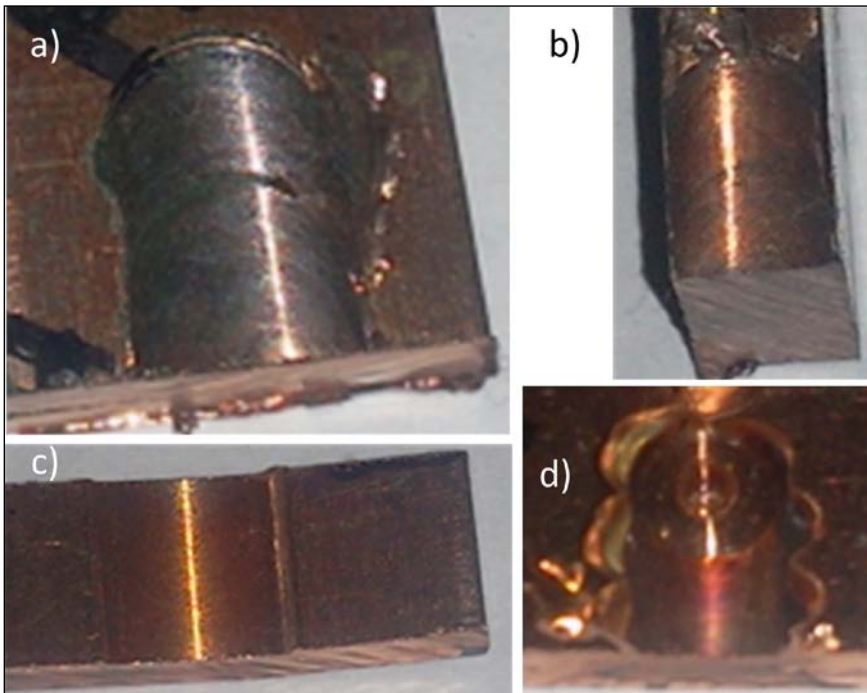
Slika 6 prikazuje temena zvarov po μ FSW z različnimi orodji, parametri



Slika 5. Vpliv vnosa toplote med μ FSW (pri varilni hitrosti 37 mm/min in orodju A na pojav podolgovatih lunckerjev: a) μ FSW-varjeni vzorec, b) RPF = 51,3 obr/mm, c) RPF = 31,9 obr/mm in d) RPF = 16,2 obr/mm

in zvarnimi spoji. Zvari na sliki 6a in 6c so bili narejeni s podobno zasnovo orodja (spremenjena dolžina čepa), z enakimi parametri varjenja v prekrovnem in sočelnem spoju. Oksidirana površina zvara pri prekrovnem spoju na sliki 6a je posledica manjšega odvoda toplote z mesta varjenja. Pri enakih varilnih parametrih in varjenju v sočelnem zvaru površina ni oksidirana zaradi hitrega odvajanja toplote (slika 6c). Sočelni zvari na sliki 6b in 6d so bili narejeni z istim orodjem in parametri v prekrovnem in sočelnem zvarnem spoju. Varjenje je bilo opravljeno z manjšim vnosom toplote, zato oksidacija temena zvara v prekrovnem spoju ni bila izrazita, medtem ko je v sočelnem spoju ni bilo. Razlog za to razliko je odvajanje toplote izpod rame orodja na vzorce. Oksidacija površine je naslednja napaka μ FSW-varjenja, ki se pojavi na površini zvara, če je material varjenca nagnjen k oksidaciji in se segreje nad temperaturo oksidacije.

Slika 7 prikazuje makroobrase zvarov s slike 6. Nastali zvari so bili brez napak, ker je bil vnos toplote med varjenjem ustrezen. »Čebulni obroči« (onion rings) so vidni na sliki 7a. Material pod orodjem se je zaradi večje hitrosti rotacije orodja še bolj izrazilo mešal tudi s kroženjem v prikazani ravnini. Čebulni obroči so



Slika 6. Prikaz temen varov μ FSW-varjenja: a) prekrivni spoj (orodje B, RPF = 20,4 obr/mm, 93 mm/min, 3°), b) sočelni spoj (orodje D, RPF = 135,7 obr/mm, 14 mm/min, 5°), c) sočelni spoj (orodje C, RPF = 20,4 obr/mm, 93 mm/min, 3°) in d) sočelni spoj (orodje D, RPF = 135,7 obr/mm, 14 mm/min, 5°)

značilna struktura, ki se pojavi pri večji hitrosti rotacije orodja glede na hitrost varjenja.

Na sliki 7b–d) je jasno vidna napaka izrivanja materiala na straneh vara. To je značilna napaka FSW-varjenja, povezana s prevelikim ugrezom orodja oz. slabim nadzorom varjenja. Ko je vnos toplote višji, se pri uporabi univerzalnega stroja brez krmiljenja gibanja orodja ma-

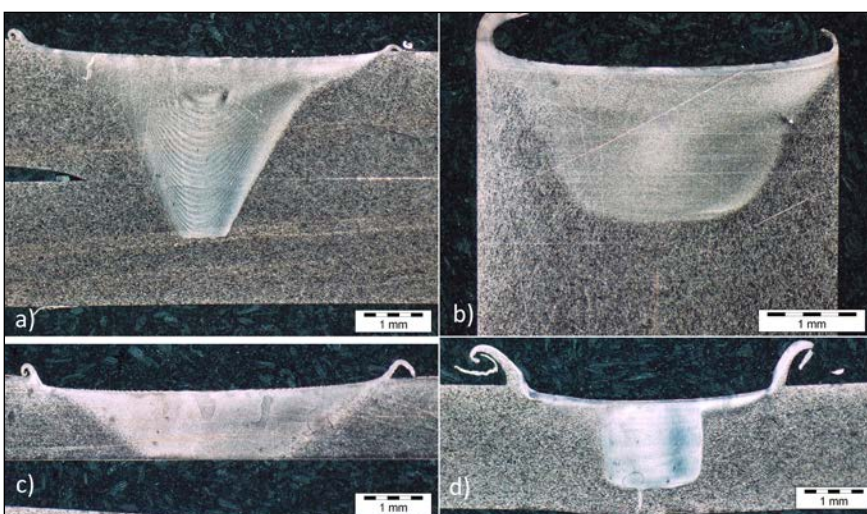
terial segreje in postane mehkejši. Pri enakih aksialnih silah v Z-smeri se zaradi mehkejšega osnovnega materiala sile sprostijo s potopitvijo orodja v varjenca. To povzroči čezmerno izrivanje materiala na straneh zvara. Izrivanje materiala je mogoče odstraniti med varjenjem, če se uporabljajo orodja z rezilnim robom za oblikovanje temena vara.

Slika 8 prikazuje mikroobrus (pre-

krovni spoj, varjen z orodjem A), pri katerem sta dve napaki. Prva je podolgovati lunker, ki se pojavi zaradi majhnega vnosa energije, druga pa je neujemanje varjenčev zaradi neustreznega vpenjanja. Na slikah 8b in c) lahko opazimo, da je velikost zrn v mešani coni močno zmanjšana v primerjavi z osnovnim materialom. Precejšnje zmanjšanje velikosti zrn nastane zaradi mešanja materiala pri nižjih temperaturah pri visokem tlaku pod ramo orodja. Podobno zmanjšanje so opazili tudi drugi avtorji [20].

Naredili smo natezne teste na sočelnih zvarih. Trdnosti zvarjenih spojev so bile med 272,3 MPa (spoj je prikazan na sliki 7c) in 419,3 MPa (spoj je prikazan na sliki 7d). Natezna trdnost spoja je primerljiva trdnosti osnovnega materiala (290–360 MPa). Višja trdnost je lahko posledica izboljšane mikrostrukture vara zaradi termomehanske obdelave s trenjem in mešanjem.

Na zvarih smo izmerili mikrotrdoto (HV 0,3) čez zvarni del 0,3 mm pod površino zvara. Rezultati so prikazani na sliki 9. Mikrotrdota bakra pred varjenjem je bila med 105 HV in 115 HV. Na sliki 9 (orodje C, RPF = 20,4 obr/mm) je padec trdote v območju varjenja povezan z višjim vnosom toplote, ki povzroča višjo temperaturo vara in s tem mehčanje materiala. Če je bil vnos toplote manjši in v območju med 12 in 16 obr/mm, se trdota vara ni spremenila. Ti varilni pogoji so optimalni, če upoštevamo, da sprememba trdote spremeni električno prevodnost in preoblikovalnost. Pri tem smo zane-marili vpliv zmanjšanja zrn; material z manjšimi zrnji ima manjšo električno prevodnost. Razlog za višjo mikrotrdoto pri varjenju z orodjem D pri RPF 135,7 obr/mm je manjši vnos toplote zaradi manjše rame orodja in kvadratne oblike čepa. Pri hladnih pogojih varjenja so zrna izrazito majhna zaradi plastične deformacije, ki poveča trdoto.



Slika 7. Makrostruktura μ FSW-varov: a) prekrivni spoj (orodje B, RPF = 20,4 obr/mm, 93 mm/min, 3°), b) sočelni spoj (orodje D, RPF = 135,7 obr/mm, 14 mm/min, 5°), c) sočelni spoj (orodje C, RPF = 20,4 obr/mm, 93 mm/min, 3°) in d) sočelni spoj (orodje D, RPF = 135,7 obr/mm, 14 mm/min, 5°)

4 Zaključki

Vnos toplote in tip spoja vplivata na odvod toplote in površinsko oksidacijo vara.

Orodje, oblikovano v piramido in blok, ustvari več toplote z mešanjem materiala okoli čepa, zato dosega trdnost spojev brez napak v primerjavi cilindričnim čepom pri enakih varilnih pogojih.

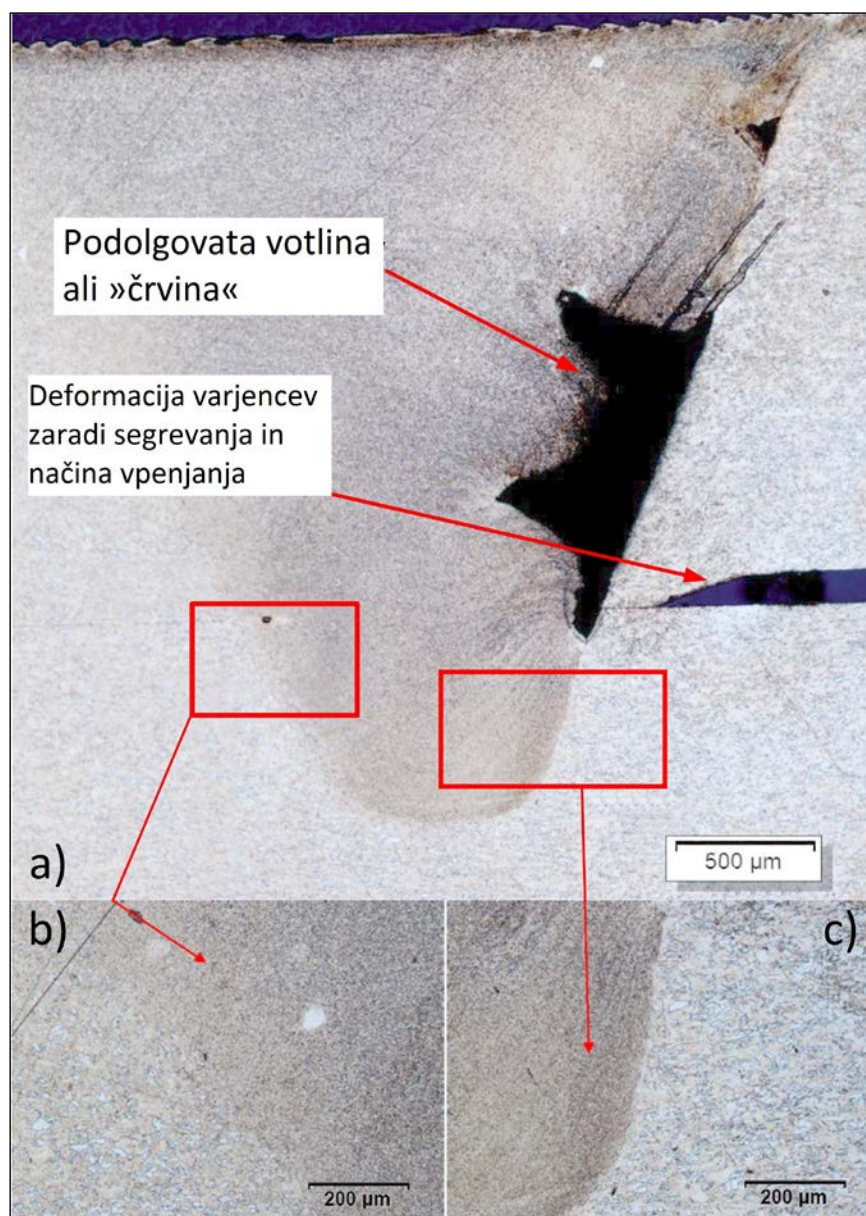
V coni mešanja se velikost zrn zmanjša zaradi termomehanske obdelave s trenjem in mešanjem, ki lahko izboljša mehanske lastnosti zvara.

Med μ FSW-varjenjem nastajajo podobne varilne napake kot pri običajnem FSW-varjenju. Podolgovati lunckerji se tvorijo na napredujoči strani orodja zaradi visokega odvajanja in majhnega vnosa toplote. Oksidacija temena vara se pojavi zaradi segrevanja varjenca nad temperaturo oksidacije. Izrivanje materiala nastane pri preveliki potopitvi orodja.

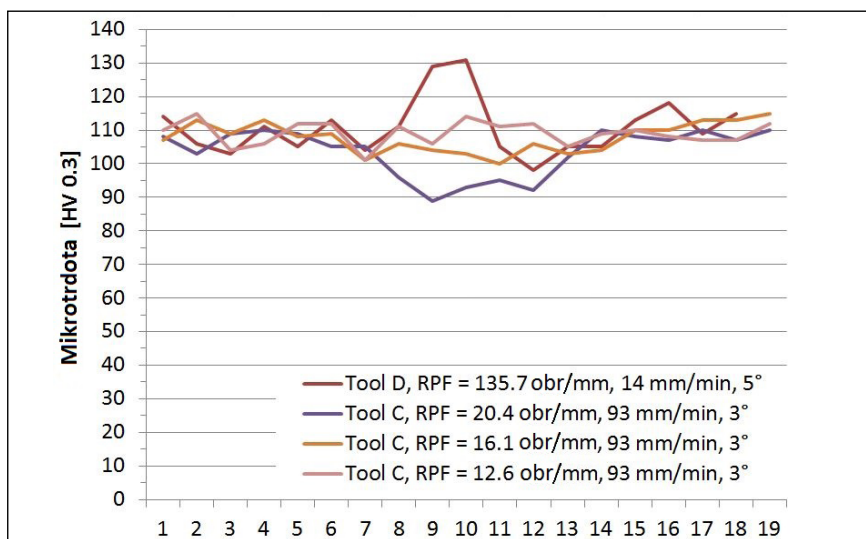
Optimalne varilne pogoje smo dosegli z orodjem s premerom rame 6 mm pri RPF med 12 in 17 min/mm in varilni hitrosti 93 mm/min.

Literatura

- [1] L. Brown, CDA Publication No 98, (1994), 1–64.
- [2] M. Pleterski, J. Tušek, T. Muhič, L. Kosec, J. of Mater. Sci. & Technol., 27 (2011) 8, 707–713.
- [3] C. Ruettimann, R. Bartlome, N. Dury, Reproducible copper welding – Combining IR and green light is key, Industrial laser solutions for manufacturing, PennWell Corporation, Tulsa, 2013.
- [4] D. Kaminski, How to choose the best laser for your marking application, Laser Focus World, Pennwell Corporation, Tulsa, 2011.
- [5] J. S. Agapiou, T. A. Perry, J. of Manuf. Proc., 15 (2013) 4, 549–557.
- [6] S. Simončič, P. Podržaj, Meas. Sci. Technol., 23 (2012) 6, 1–7.
- [7] A. A. Shirzadi, E. R. Wallach, Sci. Technol. Weld. Join., 9 (2004) 1, 37–40.



Slika 8. Mikrostruktura μ FSW-varov (orodje A, RPF = 10,1 obr/mm, 116 mm/min, 3°): a) celoten zvar s stikom med cono mešanja in osnovnim materialom, b) nazadujoča stran in c) napredujoča stran orodja



Slika 9. Mikrotrdota (HV 0,3), merjena preko vara in osnovnega materiala

- [8] M. Gojić, L. Vrsalović, S. Kožuh, A. C. Kneissl, I. Anžel, S. Gudić, B. Kosec, M. Kliškić, J. Alloys Comp., 509 (2011) 41, 9782–9790.
- [9] H. Dyja, S. Mróz, A. Milenin, J. Mater. Proc. Technol., 153–154 (2004), 100–107.
- [10] T. Pepelnjak, V. Magoč, B. Barišić, Metalurgija, 51 (2012) 2, 153–156.
- [11] M. Šimic, M. Debevec, N. Herakovič, J. Mecha. Eng., (in print), DOI:10.5545/sv-jme.2013.1104.
- [12] J. Brnić, M. Čanadija, G. Turkalj, D. Lanc, T. Pepelnjak, B. Barišić, G. Vukelić, M. Brčić, Mater. Manuf. Process. 24 (2009) 7/8, 758–762.
- [13] A. Nagode, G. Klančnik, H. Schwarczova, B. Kosec, M. Gojić, L. Kosec, Eng Fail. Anal., 23 (2012), 82–89.
- [14] R. Nandan, T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia, Progress Mater. Sci., (2008) 980–1023.
- [15] J. Teimournezhad, A. Masoumi, Sci. Technol. Weld. Join., 15 (2010) 2, 166–170.
- [16] W. M. Thomas, K. I. Johnson, C. S. Wiesner, Adv. Eng. Mater., 5 (2003) 7, 485–490.
- [17] L. Cederqvist, C.D. Sorensen, A. P. Reynolds, T. Öberg, Sci. Technol. Weld. Join., 14 (2009) 2, 178–184.
- [18] Y. M. Hwang, P. L. Fan, C.H. Lin, J. Mater. Proc. Technol., 210 (2010) 12, 1667–1672.
- [19] W.-B. Lee, S.-B. Jung, Mater. Letters, 58 (2004) 6, 1041–1046.
- [20] H. J. Liu, J. J. Shen, Y. X. Huang, L. Y. Kuang, C. Liu, C. Li, Sci. Technol. Weld. Join., 14 (2009) 6, 577–583.
- [21] R. M. Leal, N. Sakharova, P. Vilaça, D. M. Rodrigues, A. Loureiro, Sci. Technol. Weld. Join., 16 (2011) 2, 146–152.
- [22] I. Galvao, A. Loureiro, D. M. Rodrigues, Advanc. Mater. Resear., 445 (2012), 631–636.
- [23] Wieland-k32, in, Wieland, pp. 2.

Micro Friction Stir Welding of Copper Contacts

Abstract: Electrical industry is using high electro conductive copper like CuOF, CuETP, CuOFP and CuAg 0.02 for the production of different electronic products. The joining of copper or its alloys is difficult since the weldability of materials is limited when using conventional welding technologies like arc welding, resistance welding or laser welding due to their properties, such as good electrical and temperature conductivity, low electrical resistance and high reflection (low absorption of laser beam, can be increased by using green light laser beam). The weldability of these materials is better when using friction welding technology, ultrasonic technology or vibrational technology. In this paper, the micro Friction Stir Welding (μ FSW) of electrical contacts is investigated. Different μ FSW tools are used and welding parameters are tested in order to find the welding parameters at which a sound weld could be obtained. Typical welding defects are evaluated, and optimal welding parameters and tools are defined. The Vickers microhardness was measured, which revealed the influence of the welding parameters on the change of hardness.

Keywords: micro friction stir welding (μ FSW), Cu ETP, tensile test, microstructure, welding defects

Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo Borisu Bellu, Nataši Rant in Niki Breskvar za pomoč pri eksperimentalnem delu. Raziskavo je financirala ARRS po pogodbi L2-4183.

HYDAC

Komponente in
hidravlični sistemi,
že 50 let!

Hydac d.o.o.,
Zagrebška c. 20,
SI-2000 Maribor
telefon: +386 [2] 460 15 20
email: info@hydac.si

