

# Spajanje kablov, konektorjev in drugih električnih elementov v trajno zvezo

Janez TUŠEK, Tadej MUHIČ, Marko HRŽENJAK, Ladislav KOSEC

**Povzetek:** V članku je prikazanih nekaj osnov spajanja (varjenje, spajkanje) različnih električnih elementov po več različnih postopkih in nekaj praktičnih primerov elementov, ki jih spajamo in spojene uporabljamo v elektrotehnikah. V prvem delu je predstavljen problem, podan je pregled literature s tega področja in prikazani so najpogosteje uporabljani postopki spajanja električnih elementov v trajno zvezo. Osrednji del članka je posvečen spajanju električnih komponent s poudarkom na uporovnem, ultrazvočnem, laserskem, mehanskem in hibridnem varjenju ter spajkanju. Shematsko je prikazana oprema za ultrazvočno varjenje, za različna uporovna varjenja in opisane so tehnologije, ki jih uporabljamo pri teh načinih varjenja. Narejenih in prikazanih je nekaj makroobrusov spojev, izdelanih po različnih postopkih. Na koncu članka so podani zaključki, ugotovitve in nekatere smernice za nadaljnje raziskovalno delo na tem področju.

**Gljučne besede:** električni elementi, varjenje, hibridno varjenje, spajkanje, laser, ultrazvok

## ■ 1 Uvod

Spajanje najrazličnejših električnih elementov v trajno zvezo z dobro električno prevodnostjo in pogosto z dobro trdnostjo je potreba na širokem tehničnem področju. Električni elementi so izdelani iz različnih materialov, oblik, dimenzij in se uporabljajo za različne namene. Razlikujejo se predvsem glede na namen uporabe in električno moč, ki jo morajo prenašati. Najpogosteje so izdelani iz bakra, pogosto iz medu in redkeje iz srebra ali drugih zlitin. Pogosto pa so

električni elementi prevlečeni z drugo kovino, kar sicer olajša električni kontakt in električno prevodnost, zelo pogosto pa oteži spajanje v trajno zvezo z varjenjem. Izjema je le spajkanje, kjer prevleka deluje kot spajka. V nekaterih primerih ti spojeni elementi prevajajo le električni tok, v drugih pa morajo prenašati tudi mehansko silo. Pogosto se dogodi, da spoj »popusti« in slabo prevaja električni tok, kar pomeni, da se poveča električna upornost, da se spoj greje in poveča izguba električne energije. Lahko pride celo do iskrenja, do porušitve spoja in prekinitve prenosa energije ali pa zaradi isker celo do vžiga snovi v bližini spoja. Zelo pogosta zahteva za te spoje je tudi korozijska odpornost v različnih bolj ali manj agresivnih medijih.

Električne elemente v splošnem lahko povežemo z vijačno zvezo, lahko jih spojimo z mehansko silo s preoblikovanjem v toplem ali hladnem, lahko jih spajkamo ali varimo. Če želimo

imeti zanesljiv in dolgotrajen spoj z minimalno maso in minimalnimi dimenzijami, ga moramo zvariti ali spajkati.

## ■ 2 Opis problema

Spajanje elementov predstavlja v elektrotehnikah zelo zahtevno tehnologijo. Vsak spoj, preko katerega se prevaja električni tok, lahko predstavlja šibko točko v sistemu. Prav zato je pomembno, da so spoji izdelani brez napak in ne smejo predstavljati dodatnega upora v električnem tokokrogu. Pogosto pa spoj prenaša tudi mehansko obremenitev, ki je lahko statična ali dinamična z različno amplitudo in različno frekvenco.

Pri spajanju električnih elementov v splošnem predstavlja poseben problem varivost materialov. Večina materialov, iz katerih izdelujemo električne elemente, ima slabo varivost. Dodatno težavo pri izvedbi tehnologije spajanja pa lahko pred-

Prof. dr. Janez Tušek, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; Tadej Muhič, univ. dipl. inž., Marko Hrženjak, univ. dipl. inž., oba TKC, d. o. o., Ljubljana, prof. dr. Ladislav Kosec, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta



**Slika 1.** Prikaz nekaterih električnih elementov, ki so spojeni z različnimi postopki: **1** – lasersko varjeni spoji, **2** – elektroporovno zvarjeni žici z drugim elementom, **3** – elementi, spojeni s hibridnim postopkom (kompaktiranje), **4** – ultrazvočno zvarjena elementa, **5** – ploščici, ki sta spajkani z električno upornovno energijo, **6** – spoj, izdelan z elektroporovnim varjenjem, **7** – zvarjeni spoji, izdelani z mehansko energijo

stavlja različnost materialov, ki jih moramo variti, ali pa različnost oblik in dimenzij. Vse naštetu vpliva na pripravo tehnologije varjenja in posledično na kakovost izdelanega spoja. H kakovosti zvarjenega ali spajkanega spoja štejemo njegovo električno upornost, mehansko trdnost, korozijsko obstojnost in v mnogih primerih tudi videz.

Na *sliki 1* je prikazanih petnajst različnih spojev, ki povezujejo električne elemente v trajno zvezo. Z 1 so označeni električni elementi, ki so spojeni z laserskim žarkom. Z oznako 2 sta prikazani dve pletenci iz zelo tankih pokositrenih žic, ki sta uporovno privarjeni na ploščico. Elementa z oznako 3 sta varjena z mehansko silo in elektroporovno. Postopek imenujemo kompaktiranje. Z oznako 4 sta elementa spojena z ultrazvokom. Elektroporovno spajkano sta spojena elementa z oznako 5. Čisto elektroporovno varjenje je prikazano s primerom z oznako 6.

Očesna spojka in viličasti konektor sta z žicami spojena samo z mehansko silo, podobno kot jekleni in bakreni element, vsi so označeni s 7.

Vprašanje je, kateri postopek spajanja je za električne elemente najbolj primeren?

### ■ 3 Pregled postopkov spajanja električnih elementov

V praksi in iz literature so poznani številni postopki spajanja električnih elementov v trajno zvezo. Proizvajalci izbirajo postopke na osnovi različnih kriterijev. Pri izbiri vrste postopka za spajanje morajo biti vedno na prvem mestu zanesljivost izvajanja izbrane tehnologije, kakovost izdelanega spoja in ekonomičnost.

#### 3.1 Pregled literature

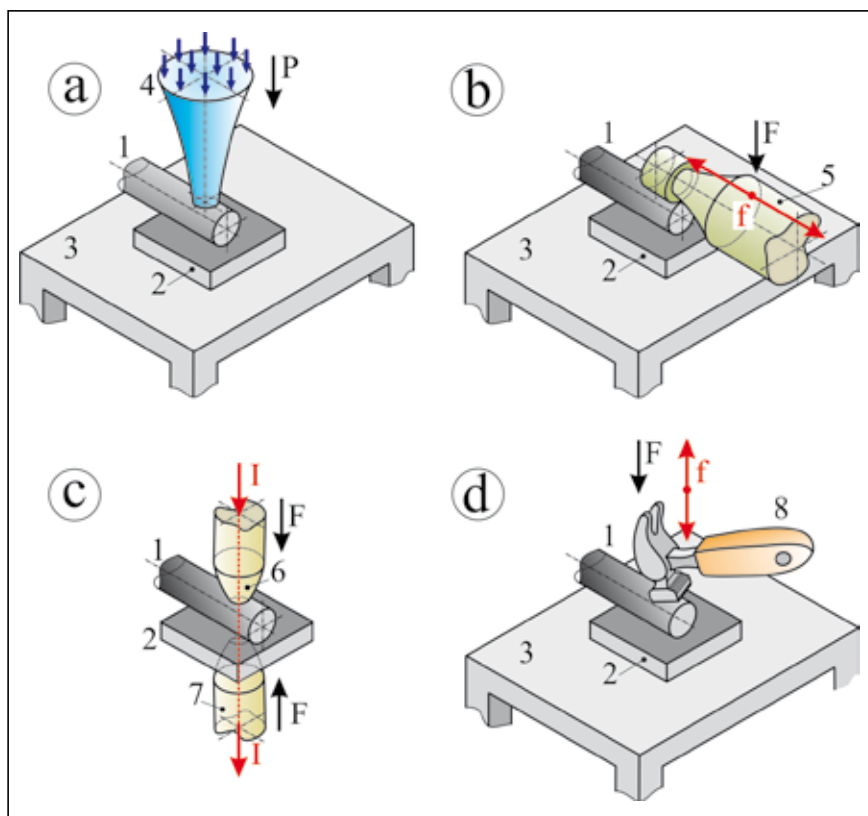
V literaturi lahko najdemo kar nekaj člankov, posvečenih obravnavani

problematiki. Nismo pa našli članka, ki bi analiziral in primerjal posamezne postopke spajanja električnih komponent s prikazi makroobrusov teh spojev. Obstajajo članki za posamezne varilne postopke ali postopke spajanja. V nekaterih primerih pa so v člankih obravnavani tudi hibridni postopki spajanja električnih komponent. Med njimi je najbolj poznano »kompaktiranje«. Poznani so še drugi hibridni postopki, namenjeni predvsem varjenju izoliranih žic med seboj ali pa na različne druge elemente [15, 22, 36].

Pregled literature lahko razvrstimo po postopkih in tehnologijah spajanja. Nekaj objav opisuje mikrovarjenje in mikrosvajkanje v splošnem [1–3]. V zadnjem času je bilo objavljenih največ člankov o laserskem varjenju različnih električnih komponent [4–14]. Za lasersko varjenje raziskovalci v večini primerov uporabljajo laser Nd:YAG z valovno dolžino 1024 nm ali pa laserje s krajšo valovno dolžino. V vseh primerih se uporablja bliskovni laser s kratkimi ali z zelo kratkim pulzi. Uporabljajo pa se tudi diodni laserji. Nekateri raziskovalci so točkovne zvarne spoje, izdelane z laserskim žarkom, računalniško analizirali, uporabili znane enačbe za prenos toplote in izdelali model za porazdelitev toplote okoli vara in za samo velikost pretaljenega območja [6, 7]. Poleg varjenja z laserskim žarkom lahko v literaturi najdemo tudi članke o mikrovarjenju z elektronskim snopom. Prikazana je uporaba elektronskega snopa, ki ima v žarišču celo manjši premer kot laserski žarek [8].

Laser lahko uporabljamo za pritrjevanje tanjših elementov na zelo tanke pobakrene ali kako drugače prevlečene površine [6], za varjenje žic, ki so gole ali pa prevlečene z različnimi organskimi ali anorganskimi snovmi, in podobno [10, 11]. Nekateri za mikrovarjenje priporočajo uporabo laserskega žarka krajših valovnih dolžin in pulzne laserje z zelo kratkimi bliski [12–14].

Drugo večje področje, ki ga obravnava literatura, je uporovno varjenje [15–23]. Vsem navedenim člankom



**Slika 2.** Shematski prikaz štirih postopkov spajanja elementov za uporabo v elektrotehnikih: **a** – lasersko varjenje, **b** – varjenje z ultrazvokom, **c** – elektroporovno varjenje, **d** – varjenje z mehansko energijo; **1** – električni kabel, **2** – ploščica (varjenec), **3** – varilna miza, **4** – laserski žarek, **5** – sonotroda, **6, 7** – elektrodi za uporovno varjenje, **8** – orodje za varjenje z mehansko energijo

je skupno to, da obravnavajo uporovno varjenje zelo tankih elementov: od žic, pletenic, čepov pa vse do tankih pločevin. Večina teh se uporablja v elektrotehnikih. Zelo dober postopek za varjenje bakrenih žic, ki so prevlečene z neprevodnim materialom, je opisan v članku [15]. V članku [16] je obravnavano uporovno varjenje nikljevih žic premera 0,2–0,5 mm in žic iz kovarja enakega premera v članku [17] ter v člankih [20, 21] iz drugih materialov. Simulacija mikroporovnega varjenja je prikazana v članku [18]. Optimizacija mikroporovnega varjenja je popisna v literaturi [19, 24]. Posebne izvedbe uporovnega varjenja električnih elementov so opisane tudi v članku [22]. Nekatere težave, ki se lahko pojavijo pri mikroporovnem varjenju, so navedene v članku [23].

Tretji postopek, ki se pogosto uporablja za spajanje električnih elementov, je ultrazvočno varjenje, ki je v literaturi pogosto obravnavano. Ultrazvok je mehansko valovanje s fre-

kvenco nad 16 kHz. Za varjenje elementov v elektrotehnikih se v literaturi najpogosteje priporoča frekvenca od 35 do 50 kHz. V nekaterih primerih se za mikrovarjenje uporabljajo frekvence ultrazvoka tudi do 1000 kHz [25]. V splošnem je v literaturi najpogosteje opisano ultrazvočno varjenje tankih žic ali pletenic na debelejših masivnih elementih [25–28].

Četrta večja skupina spajanja električnih komponent v trajno zvezo pa je spajkanje. V literaturi praktično ni mogoče najti strokovnih ali znanstvenih člankov na to temo. Najpogosteje so podani le praktični nasveti in uporabna priporočila za spajkanje električnih elementov v industriji [29–31].

Peti postopek, ki se pogosto uporablja v praksi, je mehansko varjenje. To je zelo množično uporabljan postopek, ki v literaturi ni strokovno ali znanstveno obravnavan. Nekaj splošnih opisov najdemo le na spletnih straneh [32–33].

Poleg postopkov, obravnavanih v navedeni literaturi, pa kar nekaj avtorjev opisuje tudi hibridno varjenje elementov za uporabo v elektrotehnikih. Od teh je najbolj poznano kompaktiranje (glej sliko 1 – oznaka 3). Poznanih je več različnih izvedb, opisanih v literaturi [15, 35, 36].

### 3.2 Prikaz postopkov spajanja električnih elementov v trajno zvezo

Poznamo ločljive in neločljive zveze. Ločljive zveze so vijacne ali pa so izdelane na kakšen drug primeren način, da lahko kasneje dva elementa, če je potrebno, tudi razdvojimo brez porušitve. Neločljive zveze so zvarjene ali spajkane. V obeh primerih moramo spoj porušiti, če želimo elementa razdvojiti, zato so to neločljive ali nerazdružljive zveze. Zvarjene in spajkane spoje lahko izdelamo po različnih postopkih. Pri zvarjanju običajno ne uporabljamo dodatnega materiala in elementa zvarimo neposredno. Pri spajkanju pa uporabljamo spajko, ki je po navadi že pred procesom spajanja nanosena na en ali celo na oba električna elementa. Oba postopka sta zaradi velikoserijske proizvodnje najpogosteje delno ali v celoti avtomatizirana. V praksi najpogosteje uporabljamo štiri različne postopke varjenja, poleg varjenja pa še kombinirano ali hibridno varjenje in spajkanje. Na sliki 2 so shematsko prikazani vsi štirje postopki. Med seboj se razlikujejo predvsem glede na vrsto uporabljene energije in način izvedbe spajanja. Z »a« je označeno lasersko, z »b« ultrazvočno, s »c« elektroporovno varjenje in z »d« varjenje z mehansko energijo.

Poleg prikazanih in opisanih postopkov varjenja poznamo še hibridne postopke spajanja električnih elementov v neločljivo zvezo. Sem štejemo kompaktiranje; to je uporovno varjenje v kombinaciji s preoblikovanjem, lepljenje v kombinaciji z varjenjem, »zalitje« izdelanih kontaktov z umetno snovjo, lasersko pretaljevanje in mehansko stiskanje in še nekatere druge manj pomembne in redkeje uporabljene hibridne postopke.

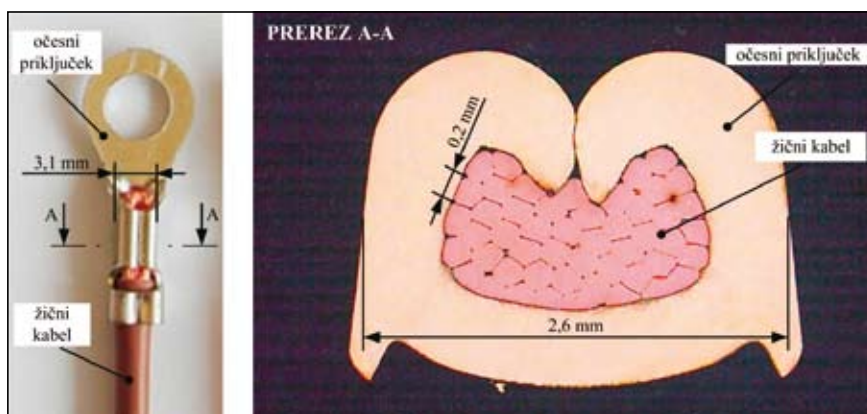
### 3.3 Varjenje električnih elementov z mehansko energijo

To je prav gotovo najstarejši način povezave elementov z električnimi kablji, žicami in drugimi deli v trajno zvezo. Postopek je dobro poznan. V vseh primerih moramo elemente pred varjenjem dobro očisti, pripraviti primerno obliko in uporabiti zadosti visoko mehansko silo. Postopek se uporablja predvsem za debelejšje kable in debelejšje druge elemente ter za materiale, ki se preprosto preoblikujejo in imajo dobro duktilnost. Med te materiale štejemo aluminij, baker, cink, med, svinec in druge.

Na sliki 1 imajo oznako 7 primeri električnega kabla, ki je zvarjen z mehansko silo z očesno sponko, kabel, spojen z viličastim konektorjem, in preprost električni zatič, ki je z mehansko silo zakovičen na ploščico. Na *sliki 2d* pa je varjenje z mehansko silo tudi shematično prikazano. Na *sliki 3* vidimo makroobrus izdelanega spoja z mehansko silo. Pri varjenju z mehansko silo lahko deformiramo le en element ali pa oba. S preoblikovanjem in z delovanjem mehanske sile lahko na meji spajanja pride do fizikalno-metalurških procesov, pri katerih se tvorijo nova zrna iz obeh materialov in s tem nastane med varjencema zelo dobra trajna zveza.

### 3.4 Ultrazvočno varjenje

Ultrazvok je mehansko valovanje in zato v splošnem štejemo ultrazvočno varjenje med varjenje z mehansko



**Slika 3.** Fotografski posnetek spoja, izdelanega z mehansko silo (levo) in (desno) makroobrus prereza tega spoja

energijo. Za varjenje z ultrazvokom uporabljamo posebno napravo, v kateri se elektromagnetno valovanje spremeni v mehansko. Osnovni princip ultrazvočnega varjenja kovinskih materialov je prikazan na sliki 2b. Najpomembnejši del naprave za ultrazvočno varjenje je sonotroda (*slika 4*), ki učinkuje z nihanjem in mehansko silo na varjenec. Sonotroda niha s frekvenco od 20 kHz do 50 kHz. V nekaterih primerih pa celo do 1000 kHz.

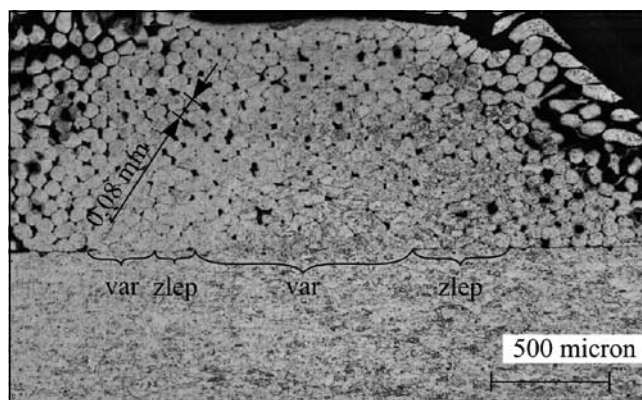
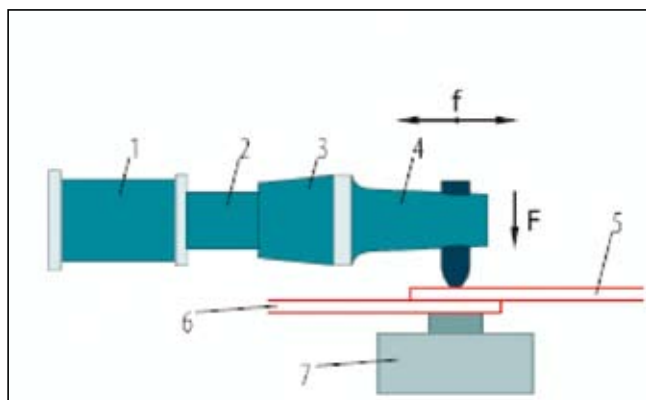
Princip ultrazvočnega varjenja temelji na mikrotrenju med varjencema, kar vodi do tvorbe čistega mehanskega spoja v mikropomenu. S trenjem med varjencema se na površini razkrojijo nečistoče in razpadejo oksidi. Kristalno zrno enega varjenca se med nihanjem vrine med dve kristalni zrna v drugem varjencu, kar vodi do tvorjenja trdnega spoja.

Ta postopek se predvsem priporoča za spajanje bakrenih pletenic z ma-

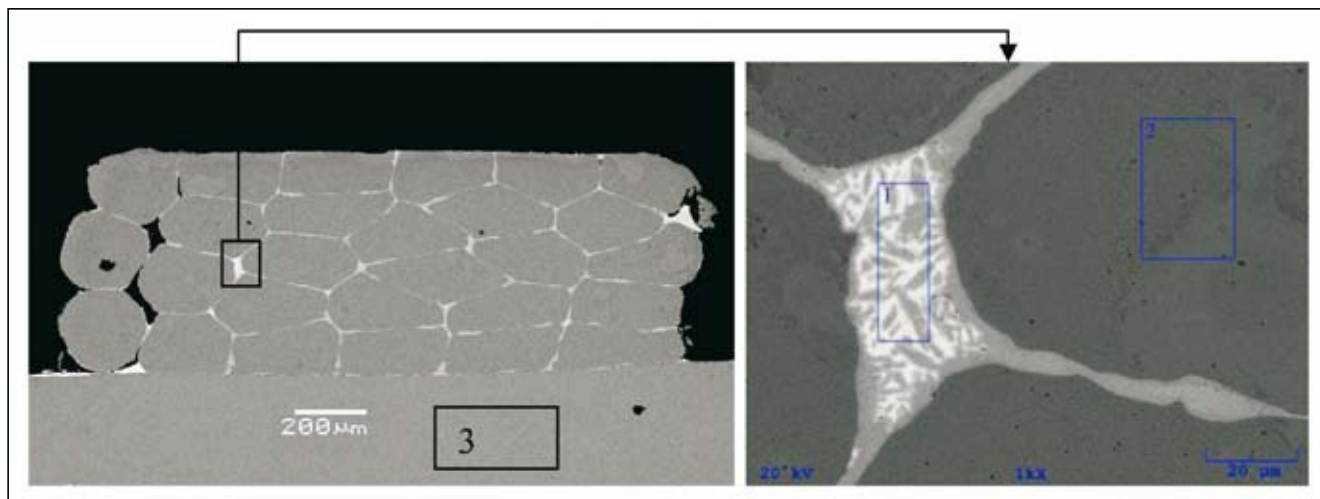
sivnim elementom in drugih manjših masivnih elementov med seboj iz enakih ali tudi iz različnih materialov. Na sliki 1 sta spoja, izdelana z ultrazvokom, označena s številko 4. Na sliki 4 (levo) pa je shematsko prikazana naprava za ultrazvočno varjenje kovinskih materialov. S slike vidimo, da sonotroda niha vzporedno z ravnino spajanja in da sila stiskanja deluje pravokotno na ravnino spajanja. Iz makrobrusa spoja (*slika 4 – desno*) vidimo, da je spoj zadovoljive kakovosti le na nekaterih mestih, da je stopnja razmešanja med varjencema izredno majhna, da okoli spoja ni prizadetega območja in da se na nekaterih mestih pojavi zlep.

### 3.5 Uporovno varjenje

Uporovno varjenje je termoelektrični proces, v katerem se razvije toplota, proizvedena na stiku dveh varjencov, skozi katera se prevaja električni tok. Čas prevajanja toka in sila stiskanja varjencov sta pomembna parametra.



**Slika 4.** Shematski prikaz naprave za ultrazvočno varjenje električnih elementov (levo): 1 – konverter, 2 – nosilni element, 3 – ojačevalnik, 4 – sonotroda, 5, 6 – varjenca, 7 – podstavek in (desno) makroobrus zvarnega spoja iz bakrenih žic in bakrene ploščice, izdelanega z ultrazvokom



**Slika 5.** Makroobrus spoja, varjenega elektrouporovno s kositrom prevlečenimi žicami in z elementom iz medi; **območje 1** ima sestavo: 45,32 % Cu in 54,68 % Sn, **območje 2**: 100 % Cu in **območje 3**: 63,95 % Cu, 36,05 % Zn.

Ime »uporovno« varjenje izhaja iz dejstva, da se zaradi električne upornosti varjencev in elektrod proizvede toplota, ki jo uporabimo za varjenje. Glede na obliko varjencev poznamo točkovno, bradavično, kolutno in sočelno varjenje. Kot vir toka uporabljamo klasični transformator, ki zagotavlja klasični izmenični varilni tok, ali pa kondenzatorski vir toka, ki proizvaja tokovne utripe. Možne pa so še nekatere druge izvedbe virov toka za uporovno varjenje. Elektrode za uporovno varjenje morajo prevajati visok električni tok, odvajati toploto, imeti zadosti visoko trdnost in zadosti visoko trdoto. Ne smejo se med varjenjem legirati z materialom varjenca, material varjencev pa se ne sme lepiti na elektrode. V praksi v večini primerov uporabljamo bakrene elektrode, ki so legirane s kromom, kadmijem, silicijem ali nikljem. Vedno pogosteje se uporabljajo elektrode iz volframa in aluminijevega oksida, izdelane s praškasto metalurgijo. Za varjenje bakra in bakrovih zlitin moramo uporabiti elektrode iz volframa, molibdena ali pa druge kovine z visokim tališčem in visoko trdnostjo ter trdoto. Na sliki 1 je uporovno zvarjeni spoj označen s številko 6. S številko 2 sta prikazana spoja, pri katerih so uporovno zavarjene prevlečene bakrene žice na podlago iz medi (glej sliko 5). Z oznako 5, na isti sliki, sta prikazana spajkana spoja, izdelana elektrouporovno.

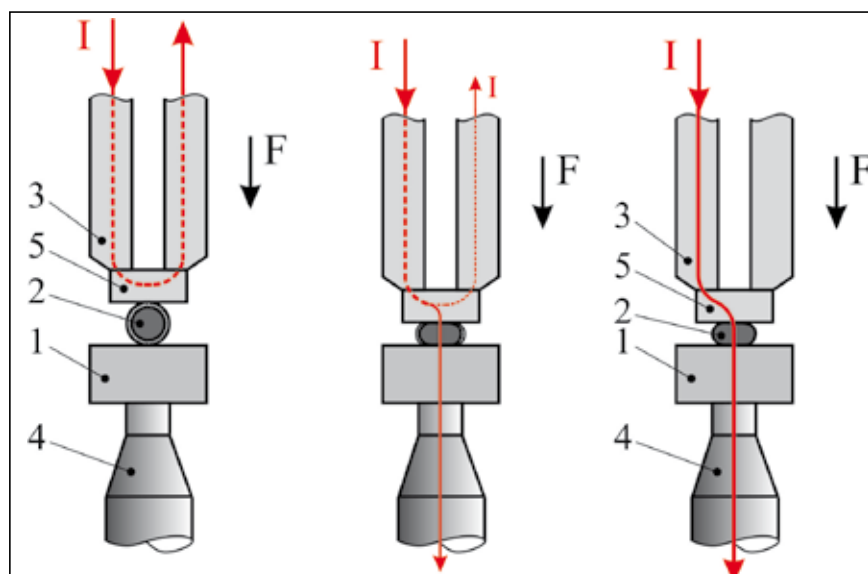
Na sliki 2c je shematsko prikazan princip uporovnega varjenja, na sliki

5 pa lahko vidimo makroobrus spoja z oznako 2 s slike 1. Na tem makroobrusu je narejena kemična analiza na območjih, označenih s številko 1, 2 in 3. Zgornji varjenec je izdelan iz tankih bakrenih žic, premera 0,2 mm, ki so pokositrene. Spodnji varjenec je iz medi. Kemična analiza posameznih območij je pokazala, da med varjenjem pride do razmešanja materialov. Predvsem se mešata kositer in baker. Na liniji spajanja obeh varjencev (žic s podlago iz medi) kositer izgine in pride celo do delne raztalitve spodnjega in zgornjega varjenca. Zato lahko ta postopek imenujemo varjenje in ne spajkanje. Kemična sestava na posameznih območjih je navedena v podnapisu k sliki 5.

Uporovno varjenje električnih elementov danes v praksi srečamo v različnih izvedbah. Na sliki 6 je prikazan princip varjenja izolirane žice na ravno ploščo. Žica je prevlečena z organskim električno neprevodnim materialom. V prvi fazi, slika 6a, teče električni tok samo skozi zgornjo elektrodo. Pri tem se ogreje del z oznako 5. S to toploto se odstrani prevleka na žici. S tem postane žica električno prevodna in tok teče preko žice v spodnjo elektrodo. Na ta način so ustvarjeni pogoji, da se žica z oznako 2 privari na ploščico z oznako 1.

### 3.6 Lasersko varjenje

Uporaba laserja za spajanje elementov v elektrotehniko predstavlja novo



**Slika 6.** Princip uporovnega varjenja žic, prevlečenih z električno neprevodnim materialom: **1** – varjenec, **2** – izolirana žica, **3** – zgornja elektroda, **4** – spodnja elektroda, **5** – grelnik. **I** – varilni tok, **F** – mehanska sila stiskanja [15]



**Slika 7.** Makroobrus lasersko izdelanega spoja iz pokositrenih bakrenih žic s čistim bakrom

tehnologijo, ki omogoča rešitve, ki jih prej nismo poznali. Njegova prednost je predvsem v veliki natančnosti pri izdelavi spoja, v veliki hitrosti varjenja in v natančni kontroli dovajanja energije. V veliki meri pa ta tehnologija omogoča spajanje zelo različnih materialov, zelo različnih oblik in tudi za zelo različne namene.

Pomanjkljivosti laserskega varjenja sta dve. Prva je zelo visoka cena za opremo in za njeno vzdrževanje in druga velika zahtevnost tehnologije izdelave. Obe navedeni slabosti moramo pri izdelavi poslovnega načrta o uvedbi laserskega varjenja upoštevati in ju stroškovno ovrednotiti.

Na sliki 1 so spoji zvarjeni z laserjem, označeni s številko 1. Na *sliki 7* pa je prikazan makroobrus spoja, sestavljenega iz pokositrenih bakrenih žic s ploščico iz čistega bakra, ki je zvarjen z laserskim žarkom. Iz makrobrusa lahko ocenimo, da je kakovost spoja dobra, da v njem ni lunckerjev ali drugih vključkov in da je stopnja razmešanja relativno visoka.

### 3.7 Spajkanje

Spajkanje se od varjenja v marsičem razlikuje. Pri spajkanju je obvezna uporaba spajke, ki se med procesom tali, omoči oba spajkanca in se po spajkanju strdi in tvori trajno zvezo. Temperatura spajkanja je nižja kot temperatura varjenja, običajno nekaj deset stopinj nad tališčem spajke. To je delovna temperatura. Spajkanca se med procesom spajkanja ne talita, ampak se segrejeta le do delovne temperature. Spajke so običajno zlitine barvnih kovin.

Glede na temperaturo tališča spajke poznamo mehko, trdo in visokotemperaturno spajkanje. Mehke spajke se talijo pod temperaturo 450 °C, trde nad to temperaturo, visokotemperaturne pa imajo tališče nad 900 °C. Pri mehkem in trdem spajkanju obvezno uporabljamo tudi talila, ki topijo nečistoče in okside, znižajo spajki površinsko napetost, povečajo omočljivost spajke na spajkancu in povečajo tekoči spajki kapilarnost. Visokotemperaturno spajkanje izva-

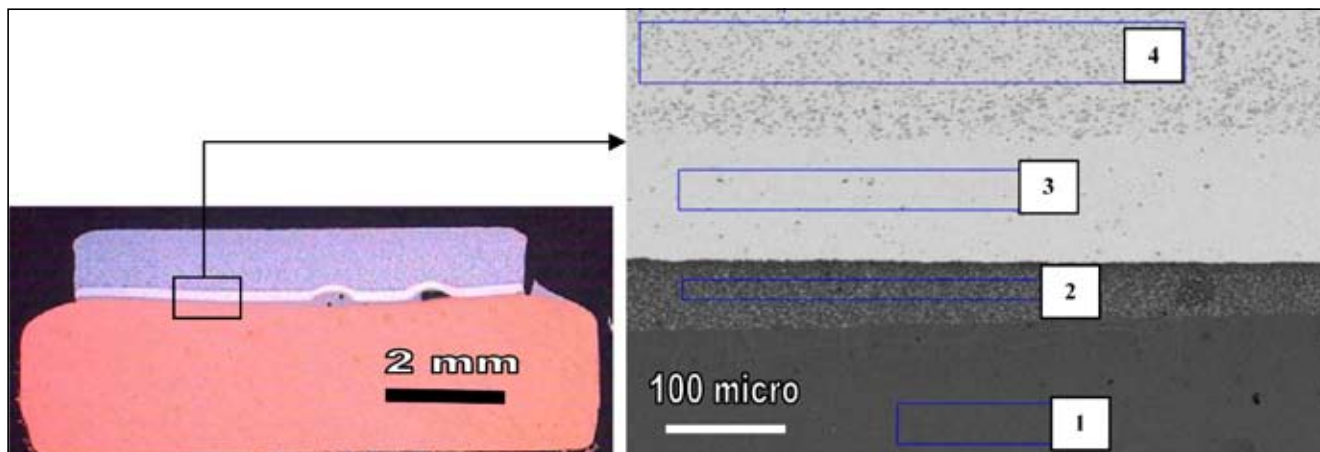
jamo z varilnim oblokom, s plazmo ali z laserjem v zaščitni atmosferi ali pa v pečeh, pretežno v vakuumu.

Električne elemente večinoma spajkamo elektroporovno. Običajno je en električni element prevlečen s spajko, ki se raztali zaradi upornosti električnega toka pri prevajanju skozi oba elementa in skozi spajko. Na sliki 1 sta dva električna elementa, ki sta uporovno spajkana, označena s številko 5. Na *sliki 8* vidimo makroobrus takšnega spoja v dveh različnih povečavah in z označenimi območji, kjer je bila narejena kemična analiza.

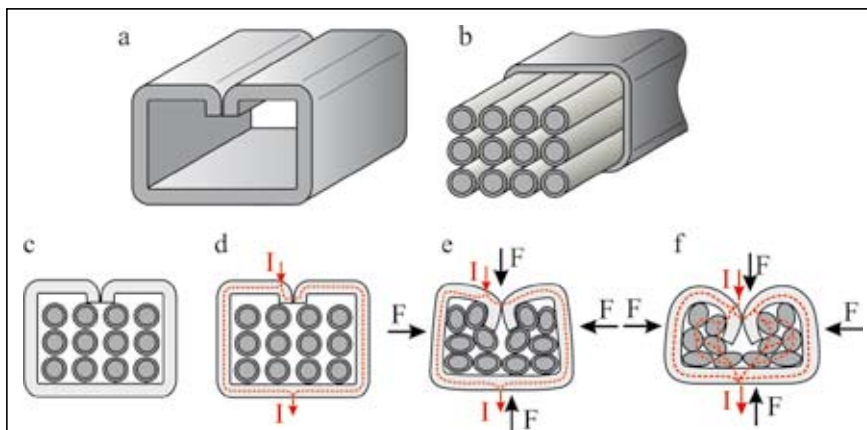
Iz makrobrusa in iz kemične analize lahko ugotovimo kar nekaj zanimivih dejstev. Osnovna plošča je iz čistega bakra, ploščica pa skoraj iz čistega srebra. Na njo se pred spajanjem nanese spajka, sestavljena iz dveh različnih plasti, pretežno iz srebra in kadmija. Med spajkanjem pride med različnimi kovinami do razmešanja. Kemična sestava na posameznih območjih, ki so označena na sliki 8, je navedena v podnapisu k sliki 8.

### 3.8 Hibridno varjenje električnih kablov

Hibridno varjenje električnih elementov v trajno zvezo je kombinacija dveh različnih postopkov. Elementa z oznako 3 na sliki 1 sta varjena z mehansko silo in elektroporovno. Postopek imenujemo kompaktiranje in je shematsko prikazan na *sliki 9*. Najprej namestimo



**Slika 8.** Makroobrus spoja, izdelanega z uporovnim spajkanjem, na sliki 1 z oznako 5 (levo) in prikaz kemične analize na štirih območjih (desno): **območje 1:** 100 % Cu, **območje 2:** 7,57 % Ag, 9,11 % P, 83,32 % Cu, **območje 3:** 0,18 % O, 0,36 % Mg, 9,70 % Cd, 90,20 % Ag, **območje 4:** 0,42 % Mg, 99,58 % Ag



**Slika 9.** Princip kompaktiranja (hibridnega varjenja) električnih elementov: **a** – bakren obroč, **b** – kabel z izoliranimi žicami, **c** – situacija pred kompaktiranjem, **d** – električni tok steče po bakrenem obroču, ga ogreje in ogreje tudi žice, da prevlečena plast iz žic izpari, **e** – tok teče preko žic in sila stiskanja deformira obroč, stisne žice in jih zavari med seboj in z obročem, **f** – s kompaktiranjem izdelan spoj

bakrene žice, prevlečene z električno neprevodno snovjo, v bakren obroč (slika 9a). Nato skozi bakren obroč spustimo električni tok, da se obroč ogreje. Zatem se uporabi mehanska sila, ki obroč stisne. S toploto, ki se razvije s prevajanjem električnega toka skozi obroč, razkrojimo snov, s katero so prevlečene žice. Na ta način postanejo žice električno prevodne in jih lahko med seboj in z obročem zvarimo (slika 9e). Slabost postopka je predvsem v stroških procesa, ker moramo praktično opraviti dva postopka za en spoj.

Prednost tega postopka je predvsem v veliki zanesljivosti izvajanja tehnologije in v kakovosti izdelanih spojev. Poznani pa so še nekateri drugi hibridni postopki varjenja električnih elementov.

#### ■ 4 Zaključki in nekaj smernic za nadaljnje delo

Ob zaključku članka lahko napravimo nekaj ugotovitev in zaključkov:

- Za spajanje električnih elementov lahko uporabimo več različnih postopkov.
- Osnovni kriteriji za izbiro postopka so zanesljivost tehnologije, oblika elementov, vrsta materiala in ekonomski izračun izvedbe tehnologije.
- Pogosto ima pri izbiri postopka veliko vlogo velikost serije elementov, ki jih moramo spajati.

- Najcenejši postopek spajanja električnih elementov je varjenje z mehansko energijo.
- Največja investicija je potrebna pri uvedbi laserskega varjenja.
- Ultrazvočno varjenje je najprimernejše za spajanje žičnih pletenic na masivno ploščico.
- Uporovno spajkanje je najprimernejše za velikoserijsko proizvodnjo.

Razvoj na tem področju bo prav gotovo moral iti v več smereh. Najpomembneje je, da se o spajanju električnih elementov razmišlja že pri snovanju novih izdelkov, pri izbiri materialov za električne elemente in pri izbiri zaščitnih snovi na žicah, ki jih je treba spajati. Velik razvoj je treba opraviti pri laserskem varjenju, vrsti laserskega žarka, obliki laserskega bliska, legi žarišča laserskega žarka in podobnem. Tudi na področju ultrazvočnega varjenja je še veliko neraziskanih področij: od optimalne frekvence, moči pa vse do optimalnega materiala za sonotrode. V članku sta prikazana dva različna načina varjenja izoliranih žic. Oba postopka sta dokaj zamudna zato bi ju bilo potrebno optimirati.

#### Literatura

[1] K.I. Johnson: Microjoining Developments for the Electronics Industry, Welding Research Institute, Abingdon, Cambs, England,

Microelectronics International, vol.1, 2, 5 – 11, 1993.

[2] Y. N. Zhou: Microjoining and nanojoining. Edited by Y. N. Zhou, University of Waterloo, Canada 2008.

[3] K. W. Guo: A Review of Micro/Nano Welding and Its Future Developments. Recent Patents on Nanotechnology, vol.3, 53 – 60. 2009.

[4] A. Gillner: Laser micro machining; 24 LTJ 2007. Wiley – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.

[5] A. Gillner, A. Olowinsky, K. Klages, J. Gedicke, F. Sari: High precision and high speed laser microjoining for electronics microsystems. International conference on lasers, applications and technologies, 11– 15 May, 2005, St.Petersburg, Russia.

[6] W. S. Chang, S.J. Na: A study on the prediction of the laser weld shape with varying heat source equations and the thermal distortion of a small structure in micro – joining. Journal of Materials Processing Technology, vol. 129, 1–3, 2002.

[7] C. K. Chung, Y. C. Lin: Simulation and fabrication for pin-to-plate microjoining by Nd:YAG laser. Microsystem Technologies, vol 12, 1– 2, 2005.

[8] G. Smolka, A. Gillner, L. Bosse, R. Lützel: Micro electron beam welding and laser machining – potentials of beam welding methods in the micro-system technology. Microsystem Technologies, vol. 10, 3, 2003.

[9] H. K. Toenshoff, K. Koerber, C. Kulik, K. Schafer: Laser micro-welding of electronic components. Proceedings vol. 4637: Photon Processing in Microelectronics and Photonics; Doi: 10.1117/12.470661, SPIE Digital Library, 2002

[10] I. A. Jones, R. J. Wise: Novel joining methods applicable to textiles and smart garments. Wearable Futures Conference, University of Wales, Newport, Wales, 14-16 September 2005.

[11] A. Gillner: Micro processing with laser radiation – Trends and perspectives, Laser Technik Journal, vol. 4, 1 2007.

- [12] P. Bozorgi: Application of YAG Laser Micro – Welding in MEMS Packaging. Microtech Conference & Expo 2010, Anaheim, June, 2010.
- [13] F. Otte, U. Stute, A. Ostendorf: Micro welding of electronic components with 532 nm laser radiation. Photon Processing in Microelectronics and Photonics VI. Proc. SPIE, vol. 6458, 645804 (2007); doi: 10.1117/12.705385, 2007.
- [14] C. J. Kulik, A. Ostendorf: Short and ultrashort laser pulses: application – driven comparison of source types. Proceedings vol. 5620, Fifth International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Isamu Miyamoto, 2004
- [15] B. H. Mo, Z. N. Guo, Y. B. Li. C. Liu: Joint Formation Mechanism and Strength in Resistance Microwelding of Brass Sheet to Fine Insulated Cu Wire. Key Engineering Materials, vol. 447 – 448, Transaction Technical Publication Switzerland, 2010.
- [16] S. Fukumoto, Y. Zhou: Mechanism of Resistance Microwelding of Crossed Fine Nickel Wires. Metallurgical and Materials Transactions, vol. 33A, Oct. 2004.
- [17] K. J. Ely, Y. Zhou: Microresistance spot welding of Kovar, steel and nickel. Science and Technology of Welding and Joining, vol. 6, 2, 2001.
- [18] B. H. Chang, M. V. Li., Y. Zhou: Comparative study of small scale and »large scale« resistance spot welding. Science and Technology of Welding and Joining, vol. 6, 2, 2001.
- [19] G. Weik, C. Schäfer, M. Ott: Widerstandsschweißen von Kontaktprofilen mit Nachsetzwegmessung. 19. Fachtagung Albert-Keil-Kontaktseminar an der Universität Karlsruhe. sep. 2007.
- [20] Z. Chen: Joint formation mechanism and strength in resistance microwelding of 316L stainless steel to Pt wire. Journal of Material Science, vol. 42, 5756 – 5765, 2007
- [21] X. Hu, G. Zou, S. J. Dong, M. Y. Lee, J. P. Jung, Y. Zhou: Effects of Steel Coatings on Electrode Life in Resistance Spot Welding of Galvannealed Steel Sheets. Materials Transactions (TJIM), vol. 51,12, 2236 - 2242, 2010.
- [22] L. B. Johnson: Process Specification for the Resistance Spot Welding of Battery and Electronic Assemblies. National Aeronautics and Space Administration, Houston, Texas, 2004.
- [23] S. J. Dong, G. P. Kelkar, Y. Zhou: Electrode sticking during micro – resistance welding of thin metal sheets. IEEE Xplore, Department of Material Engineering, Hubei Automotive Industrie Institute Shiyan, China, 2010.
- [24] S. Fukumoto, T. Matsuo. H. Tsubakino, A. Yamamoto: Resistance Microwelding of SUS304 Stainless Steel Fine Wire, Materials Transactions (TJIM), vol. 48, 4, 813 – 820, 2007.
- [25] J. Tsujimo, H. Yoshihara, T. Sano. S. Ihara: High – frequency ultrasonic wire bonding systems. Ultrasonic, vol. 38, 1 – 8, Mar. 2000.
- [26] G. Amza, V. Achim, S. Vintila, H. Nimigeau: Research regarding the ultrasound welding process modeling for wires and thin foils on plates. Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Finite Differences – Finite Elements – Finite Volumes Boundary Elements, Splaiul Independentei, 313, Bucharest, Romania, 2010.
- [27] X. Q. Sun, T. Masuzawa, M. Fujino: Micro ultrasonic machining and its application in MEMS. Sensors and Actuators A: Physical, vol. 57, 2, Nov. 1996.
- [28] Zw. Zhong, K. S. Goh: Investigation of ultrasonic vibrations of wire-bonding capillaries. Microelectronic Journal, vol. 37, 2, Febr. 2006.
- [29] <http://www.mediacollege.com/misc/solder/>
- [30] [http://www.ehow.com/video\\_4419669\\_heating-applying-solder.html](http://www.ehow.com/video_4419669_heating-applying-solder.html)
- [31] J. Arnold, E. Miller, G. Mitchell: Exploring Different Brazing and Soldering Methodes, Welding Journal, vol. 88, 4, 2009.
- [32] <http://www.homebase8.net/tech-help/crimp.pdf>
- [33] [http://www.ertyu.org/steven\\_nikkel/ethernetcables.html](http://www.ertyu.org/steven_nikkel/ethernetcables.html)
- [34] <http://video.google.com/videoplay?docid=-5938226246300065112#>
- [35] Y. Takahashi, T. Gang: Microjoining Process in Electronic Packaging and Its Numerical Analysis. Transactions JWRI, vol. 30, 1, 2001.
- [36] N. Grobiša: Spajkanje bakrenih kablov s pokositrenim priključkom. Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, Diplomaska naloga visokopolskega strokovnega študija: S 1890, 2010.

### Joining of electrical cables, connectors and other elements into a permanent joint

**Abstract:** The article shows some of the basics of bonding (welding, brazing) of various electrical elements with different procedures. A few practical examples of the different elements that are welded and used in electrical engineering are shown. The first part deals with the problem. From this area we present a review of the literature and describe the joining processes for electrical elements into a permanent joint. The central part of the paper is devoted to the joining processes for electrical components with an emphasis on laser, resistance, ultrasonic and hybrid welding and brazing. Schematically, we show the equipment for ultrasonic welding, the equipment for some different resistance welding and describe the technologies that are used in these methods of welding. There are also some cross-sections of the welded joints produced using different procedures. At the end of the article we present the conclusions, findings and some directions for further research in this field.

**Key words:** electrical components, welding, hybrid welding, soldering, laser, ultrasound