

# Armironi spajkani spoji povečane žilavosti

## Reinforced Brazed Joints with Elevated Toughness

B. Zorc<sup>1</sup>, Institut za varilstvo, Ljubljana

L. Kosec, Oddelek za materiale in metalurgijo, NTF, Univerza v Ljubljani

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-04-21

*Predlagan in dokazan je način izboljšanja mehanskih lastnosti spajkanih spojev z armiranjem. V teh spojih je povečana odpornost proti širjenju razpok ter udarna žilavost. Opisali smo dva načina trdne povezave armature in osnove. Z osnovo nepovezana ali slabo spojena armatura ne izboljša žilavosti spoja. Spoj z dobro povezano armaturo in osnovo pa ima veliko žilavost.*

*Ključne besede: spajkani spoj, armatura, nepovezana armatura in osnova, povezana armatura in osnova, mehanske lastnosti*

*A mechanism of improvement of mechanical properties, of brazed joints by reinforcing is presented and confirmed. In all joints increased crack propagation resistance and toughness are observed. Two alternative ways of good joining of the armour and the base metal are described. An unconnected or weakly connected armour has practically no influence, while an appropriately joined armour and base metal in a joint show high toughness values of brazed joints.*

*Key words: brazed joint, armour, unconnected armour and base metal, joined armor and base metal, mechanical properties*

### 1 Uvod

Armiranje spajkanih spojev je znano že iz tridesetih let, ko pojma armiranje in kompozit v svojem današnjem pomenu nista bila poznana. Večina literarnih virov ga opisuje v zvezi s spajanjem kermetov ali keramike s kovinami ali pri spajanju keramike.

Največkrat je bil uporabljen vmesni ploščati vložek<sup>1,2,3,4,5,6</sup> iz duktilnih kovin (baker, nikelj, srebro) ali iz kovin z majhno temperaturno razteznostjo (volfram, molibden). Vsaka vrsta kovin na svoj način zmanjša zaostale napetosti v spoju in nastanek napak, ki so posledica razlik v temperaturni razteznosti sestavin spajkanega spoja. Za zgoraj opisane namene so se uporabljale še različne valovite folije, mrežice in savtoja<sup>1,2,7,8</sup>.

To so značilne oblike togih in povezanih armatur, medtem ko sta pri ploščatem vložku dva spajkana spoja z vsemi značilnimi slabostmi spojev (slaba žilavost, slaba odpornost proti začetku in širjenju razpoke). Uporabljali so tudi kompozitne spajke s kovinskimi delci<sup>7,8</sup> in vlakni ogljika<sup>9,10,11</sup>.

Mehanske lastnosti armirane spajke sledi kompozitnemu mehanizmu reagiranja na zunanje obremenitve.

Po dosedaj znanih mehanskih lastnosti spajkanih spojev karbidnih trdin in jekel se kompozitne lastnosti spajke prenašajo tudi v spoj<sup>7,8</sup>. Pri spajkanju z medjo je bilo ugotovljeno skoraj dvakratno povečanje strižne trdnosti in raztezkov v primerjavi s klasično spajkanimi spoji. Ugotovljen je bil tudi vpliv trdnosti materiala armature. Tako je npr. uporaba mreže iz nerjavnega avstenitnega jekla zvečala strižno trdnost z medjo narejenega spoja za 70% v primerjavi z nearmiranim spajkanim spojem. Uporaba mrež iz maloogljivega jekla ni izboljšala striž-

ne trdnosti spoja, saj je bila trdnost tega jekla enaka ali celo slabša od trdnosti spajke oziroma medij.

Kompozitno spajko so pri kovinskih materialih uporabljali predvsem pri spajkanju v širokih režah (wide gap brazing), kjer so v spajko dodajali kovinski prah<sup>12,13,14,15</sup>. Ta se med spajkanjem ne tali, zato imajo te spajke značilno kompozitno sestavo.

Pri spajkanju jekla z bakrom so uporabljali ploščati kovinski vložek, ki je rabil za nastanek nove faze<sup>16</sup>.

Izboljšanje mehanskih lastnosti je bilo odvisno predvsem od obsega medsebojnih reakcij med spajko, delci in osnovo ter vrste dodanega materiala prahu.

### 2 Razvoj armiranih spajkanih spojev kovina - kovina

O uporabi armature (žice, mreže, valovite folije, savtoja) pri spajkanju kovin ni podatkov. Metoda ima realne možnosti za izdelavo spajkanih spojev z načrtovanimi mehanskimi lastnostmi.

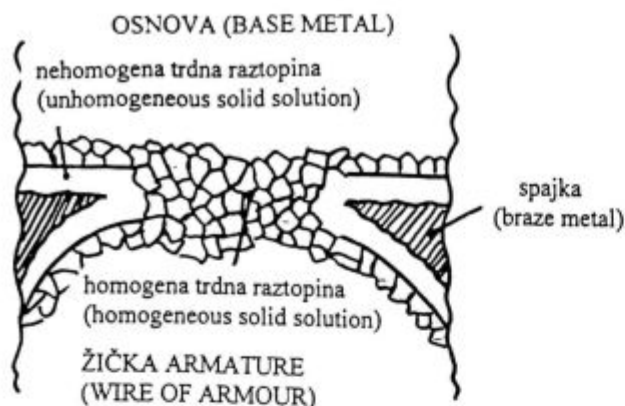
Po znanem načinu armiranja pri spajkanju karbidnih trdin ali keramike s kovino še vedno ostaja problem odpornosti proti nastanku in širjenju razpok v spajkanih spojih. Vzrok temu je vrzel med osnovo in armaturo, v kateri se nahaja spajka, kar razpoki ne otežuje ali preprečuje njenega napredovanja.

Edini pogoj za izboljšanje žilavosti in odpornosti proti širjenju razpoke v armiranem spoju je, da se armatura poveže z osnovo s trdno raztopino oziroma medsebojnim zraščanjem. Ta princip je bil prvič idejno prikazan<sup>17,18</sup> ter preizkušen in dokazan v raziskavi<sup>19</sup>. Nadaljnje raziskave žilavosti tako spajkanih spojev so vzpodbudne.

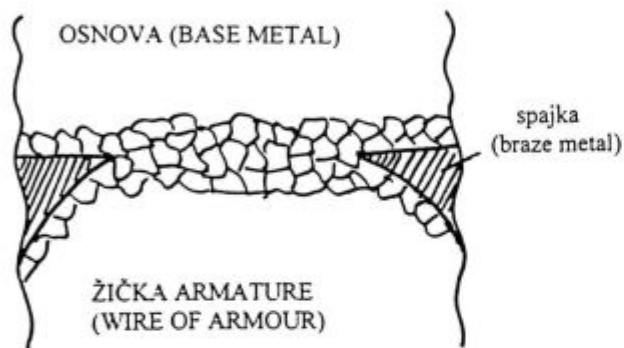
#### 2.1 Povezave armature z osnovo

Armaturo in osnovo lahko povežemo na dva načina:

<sup>1</sup> Mag. Bošt ZORC  
Institut za varilstvo  
Prijska 19, 1000 Ljubljana



a) s TLP procesom (with TLP proces)



b) z difuzijskih varjenjem (with diffusion welding)

Slika 1: Povezava armature in osnove v spajkanem spoju (shematično)  
Figure 1: Joining of armour and base metal in brazed joint (schematically)

- v tekočem - s spremembo evtektika spajke v trdno raztopino
- v trdnem - z difuzijskim varjenjem, kjer spajka pri metalurških reakcijah ni potrebna.

V tekočem povežemo armaturo na način TLP (transient liquid phase), ki temelji na razredčenju evtektične spajke na ključnem elementu (npr. bor, silicij, fosfor pri nikljevih spajkah), ki difundira v osnovo in armaturo. Tekoči evtektik se spreminja v trdno raztopino, ki se vrašča v osnovo in armaturo. Pri tem uporaba sile ni neobhodna, s stiskanjem pa se pospeši.

V trdnem povežemo armaturo in osnovo z difuzijskim varjenjem. Tekoča spajka pri tem ne sodeluje, rabi pa kot zaščita pred oksidacijo in kot polnitev prostora med segmenti armature. Spajka je do osnove in armature inertna, zato jo je potrebno odstraniti iz dela med armaturo in osnovo. Če ne, difuzijsko varjenje osnove in armature ni mogoče. To pomeni, da je potrebna dovolj velike pritiska sila med spajkanjem, kar omogoči dober kontakt osnove in armature.

Na **sliki 1** sta prikazani povezavi osnove in armature iz enakega ali sorodnega materiala.

Razlika med obema načinoma je v tem, da je pri povezavi s procesom TLP na osnovi in armaturi pas trdne raztopine, ki nastaja zaradi difuzije ključnega elementa iz spajke v osnovo in armaturo. Ta poveže obe komponenti.

Ker pri difuzijskem zvarjanju spajka ne sodeluje, tega pasu novo nastale trdne raztopine, ki bi povezal obe komponenti, ni. Tu je deformacija ene od sestavin nujna. Zato je pri povezavi pomembna kombinacija difuzije ter poprave z rekristalizacijo.

### 3 Preizkusi

Preizkusili smo naslednje materiale:

- konstrukcijsko ogljikovo jeklo (armatura: maloogljikno jeklo C < 0,1%, patentirana žica, avstenitno nerjavno jeklo vrste 18-8, spajka L-Ag40Cd)
- avstenitno nerjavno jeklo 18-8 (armatura: nerjavno jeklo 18-8, spajka L-Ag40Cd, L-Ni7)
- baker (armatura: baker, nerjavno jeklo 18-8, nerjavno jeklo 18-8 z galvanskim nanosom bakra, nerjavno jeklo 18-8 z galvanskim in naknadno žarjenim nanosom bakra; spajka L-CuP7)
- med CuZn39Pb2 (armatura: kot pri bakru).

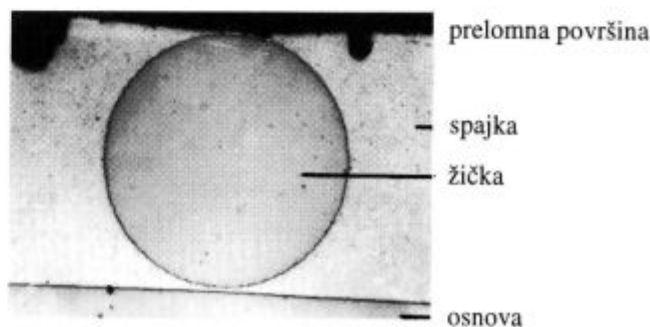
Spajkali smo s plamenskim postopkom, razen v primeru spajke L-Ni7, kjer smo spajkali v peči v zaščiti vodika in dušika.

Žilavost spojev smo merili na epruvetah dimenzij 10 x 10 x 55 mm brez zareze.

### 4 Rezultati in diskusija

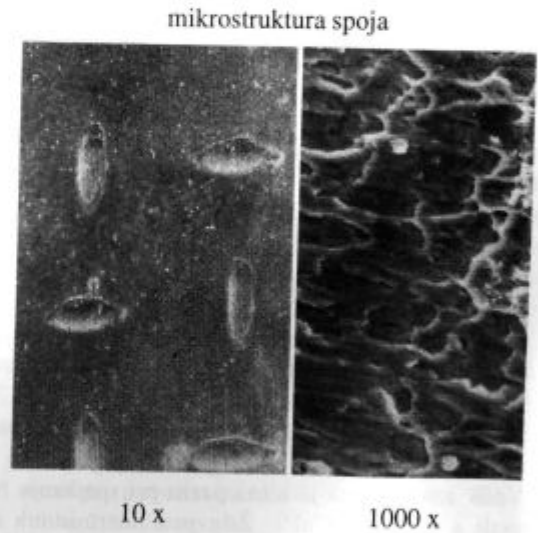
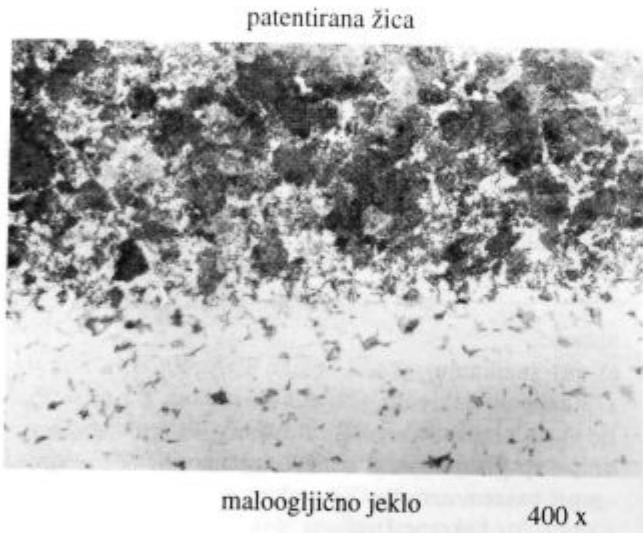
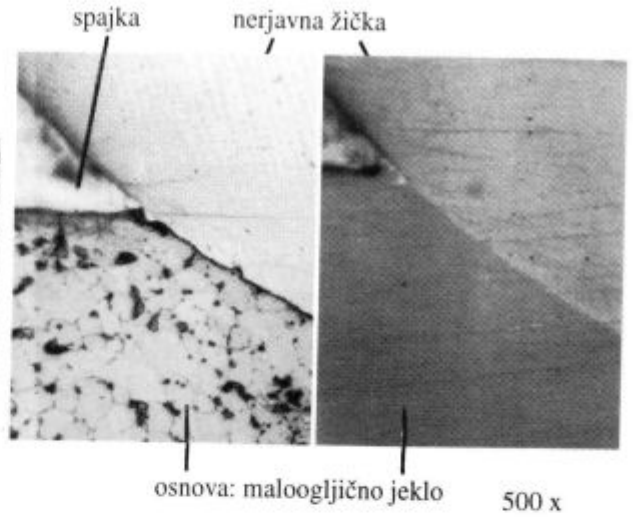
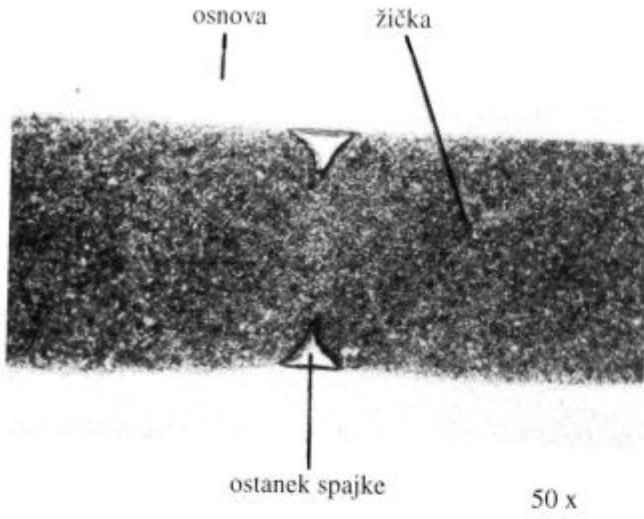
#### 4.1 Armirani spajkani spoji brez povezave osnove in armature

Na **sliki 2** je prikazan prečni prerez na prelomno površino spajkanega spoja na ogljikovem jeklu, izdelanem s spajko L-Ag40Cd in armaturo iz patentirane



Slika 2: Spoj maloogljiknega jekla z armaturo iz patentirane žice in spajke L-Ag40Cd. Prečni prerez čez prelom žilavostnega preizkušanca (pov. 50 x)

Figure 2: A joint consisting of low-carbon steel, the armour made of patented wire, and brazing filler material L-Ag40Cd. Fracture cross-section of notched test bar (magn. 50 x)

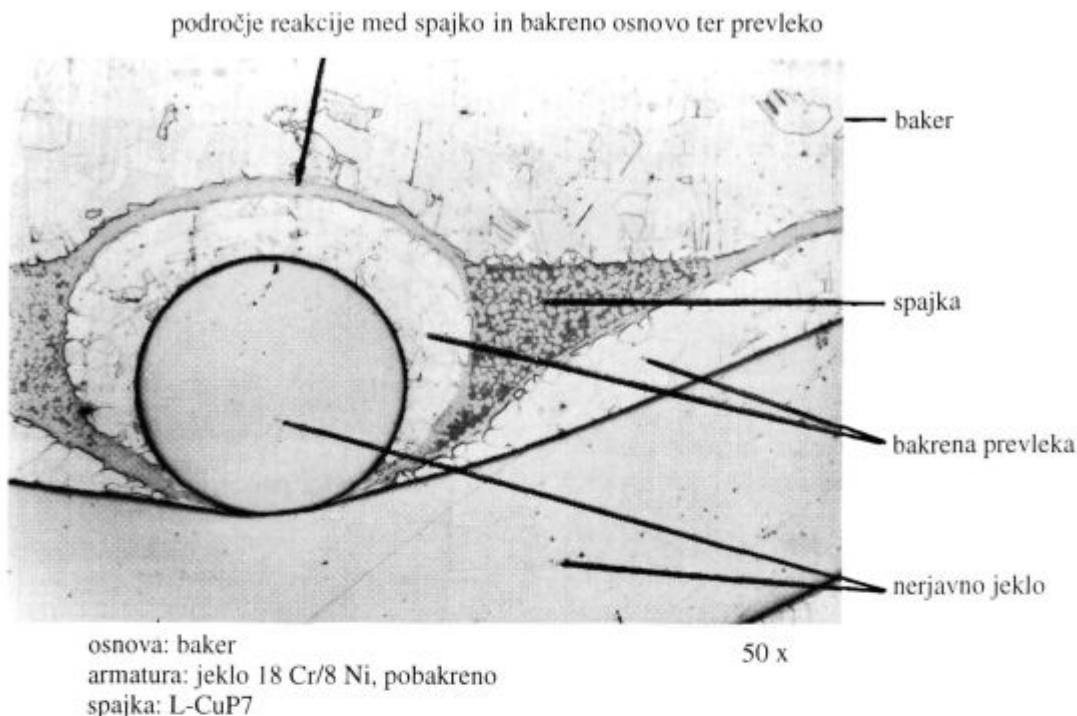


a) osnova: maloogljično jeklo  
armatura: patentirana žica  
spajka: L-Ag40Cd

prikaz površine stika med armaturo  
in osnovo (jamice); duktilni prelom  
pri strižnem preizkusu

b) osnova: maloogljično jeklo  
armatura: jeklo 18 Cr/8 Ni  
spajka: L-Ag40Cd

Slika 3: Povezava osnove in armature z difuzijskim varjenjem v spajkanem spoju  
Figure 3: Joining of base metal and armour by diffusion welding in brazed joint



**Slika 4:** Povezava armature in osnove s procesom TLP v spajkanem spoju  
**Figure 4:** Joining of armour and base metal by TLP process in brazed joint

žice. Prelom poteka po spajki na meji med armaturo in osnovo. Žilavost tako spajkanih spojev se bistveno ne razlikuje od žilavosti spojev brez armature in je 3 - 15 J/cm<sup>2</sup>, odvisno od napak v spoju. Vpliva materiala armature ni bilo opaziti.

Podobne pojave smo opazili tudi na armiranem spoju iz avstenitnega nerjavnega jekla 18-8 s srebrno spajko L-Ag40Cd. Enaki spoji, izdelani s spajko L-Ni7, so popokali že med izdelavo vzorcev, prav tako tudi nearmirani spoji.

Vpliv armature pa je bilo opaziti pri spajkanju bakra in medu s spajko L-CuP7. Žilavosti nearmiranih spajkanih spojev so bile: baker (3,6 - 3,8 J/cm<sup>2</sup>), med CuZn39Pb2 (1,1 - 2,4 J/cm<sup>2</sup>).

Izmerjene žilavosti spojev so:

**a) osnova: baker**

- armatura iz bakra: 3,6 - 7,5 J/cm<sup>2</sup>
- armatura iz jekla 18-8: 1,2 - 1,8 J/cm<sup>2</sup>
- armatura iz galvansko z bakrom prevlečenega jekla 18-8: 2,0 - 4,9 J/cm<sup>2</sup>
- armatura iz galvansko z bakrom prevlečenega in žarjenega jekla 18-8: 7,8 - 8,8 J/cm<sup>2</sup>

**b) osnova: med CuZn39Pb2**

- armatura iz bakra: 3,0 - 5,2 J/cm<sup>2</sup>
- armatura iz jekla 18-8: 0,9 - 1,0 J/cm<sup>2</sup>
- armatura iz galvansko z bakrom prevlečenega jekla 18Cr/8Ni: 1,9 - 2,9 J/cm<sup>2</sup>
- armatura iz galvansko z bakrom prevlečenega in žarjenega jekla 18Cr/8Ni: 3,9 - 4,8 J/cm<sup>2</sup>

Dvakratno povečanje žilavosti je opaziti pri uporabi bakrene armature ali galvansko z bakrom prevlečene armature avstenitnega jekla, ki je bilo po nanosu žarjeno (950°C, 2 uri).

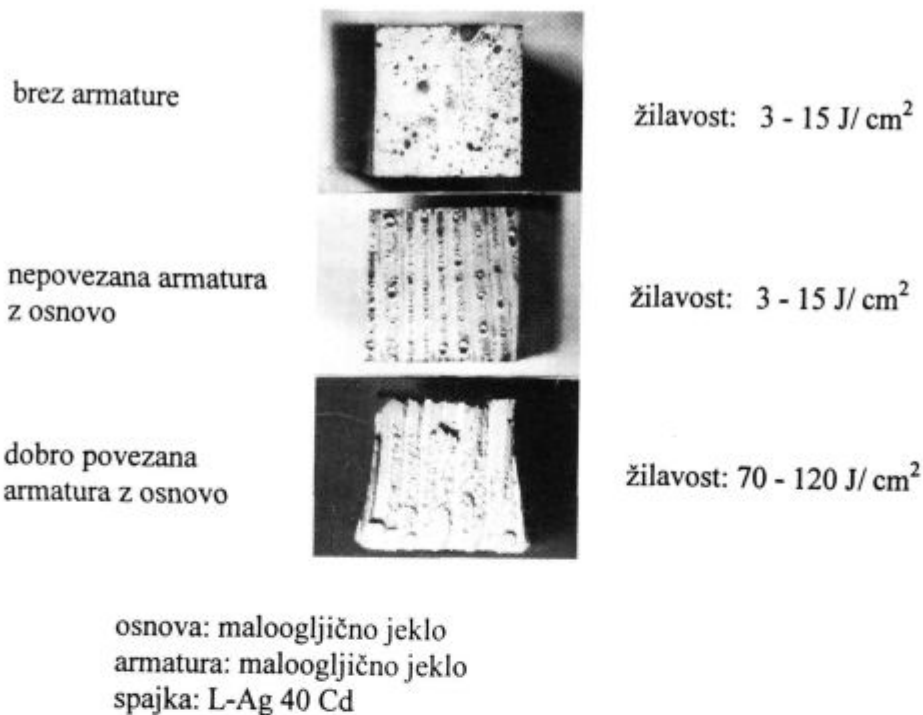
Na prerezih, prečno na prelomno površino, smo opazili:

- a) pri spajkanju jekel s spajko L-Ag40Cd in uporabi različnih jeklenih armatur je prelom po spajki ali vezni plasti med spajko in osnovo ali armaturo;
- b) pri spajkanju bakra in medu s spajko LCuP7
  - pri bakreni armaturi je prelom po spajki in ponekod tudi čez bakrene žice
  - pri armaturi iz nerjavnega jekla 18-8 poteka prelom na meji spajka - armatura ali čez spajko med posameznimi deli armature
  - pri armaturi z bakrom elektrolizno prevlečenega jekla 18-8 poteka prelom predvsem po spajki med armaturo in osnovo. Bakrena prevleka se trga od armature.
  - pri armaturi z bakrom elektrolizno prevlečene in žarjene žice jekla 18-8 je prelom pretežno po spajki med armaturo in osnovo. Opaziti je ločevanje bakrene prevleke od žice nerjavnega jekla na posameznih mestih.

V vseh primerih spajkanja bakra in medu je na stiku osnove in armature že prisotna medsebojna povezava s trdno raztopino. To vpliva na povečanje žilavosti spojev z bakreno in žarjeno z bakrom prevlečeno nerjavno armaturo.

Pri uporabi armature iz gole žice nerjavnega jekla je nastala vmesna plast (ki je najverjetneje železov ali nikljev fosfid). Ta je zelo krhka. Povezava elektrolizno





Slika 5: Primerjava prelomnih površin žilavostnih preizkušancev  
Figure 5: Comparison of fracture surfaces of toughness test pieces

nanesenega bakra na jeklo je slaba. Zato se žilavost spojev ne izboljša.

#### 4.2 Armirani spajkani spoji s povezavo armature in osnove

Na **sliki 3** je prikazan primer povezane armature iz patentirane žice z osnovo iz ogljikovega jekla. Spoj je bil spajkan s spajko L-Ag40Cd. Slika prikazuje popolno zraščenost armature in osnove. Zraščena pa sta tudi segmenta armature. Ostanek spajke sta svetla trikotnika (**slika 3a**).

Podoben učinek je bil tudi pri uporabi armature iz maloogljičnega jekla in avstenitnega nerjavnega jekla na ogljikovem kot tudi na nerjavnem jeklu. **Slika 3b** prikazuje primer zraščanje armature iz nerjavnega jekla z osnovo iz ogljikovega jekla pri spajki L-Ag40Cd. Žica armature je malo vtisnjena v osnovo. Tu spajke ni. Dobro povezavo armature iz nerjavnega jekla z osnovo iz ogljikovega jekla pri strižnem iztrgu armature iz osnove potrjuje tudi duktilen prelom.

Na **sliki 4** je prikazana povezava galvanško z bakrom prevlečene armature iz nerjavnega jekla in osnove iz bakra. Uporabljali smo spajko L-CuP7.

Spajka je reagirala z osnovo in galvanško prevleko. Na večjem delu stika med žičkami se je mikrostruktura spremenila iz evtektika v trdno raztopino.

Do enakega pojava je prišlo v primeru naknadno žarjenih galvanško prevlečenih žic in uporabi teh kot armature pri spajkanju medu z isto spajko.

Meritve žilavosti spajkanih spojev kažejo dobre rezultate. Tako je bila žilavost spojev iz maloogljičnega jekla z armaturo iz drugega maloogljičnega jekla, spajkanih s spajko L-Ag40Cd, 106-124 J/cm<sup>2</sup>. To je v povprečju 12-kratno povečanje v primerjavi z enakim spojem brez armature ali z nepovezavo armature in osnove. Na **sliki 5** je vidna primerjava prelomnih površin žilavostnih preizkušancev spajkanih spojev iz ogljikovega jekla s spajko L-Ag40Cd. Veliko prečno širjenje je le pri ustrezni povezavi armature z osnovo. Temu je vzrok velika žilavost spojev.

## 5 Sklepi

Naše raziskave povedo, da je moč z armiranjem pomembno izboljšati odpornost spojev proti začetku in širjenju razpok ter povečati njihovo žilavost k povečanju žilavosti prispeva predvsem povečanje duktilnosti. Za povečanje žilavosti morajo biti izpolnjeni določeni pogoji.

Armaturo in osnovo morata biti dobro povezani. Povečanje žilavosti je odvisno od izbire vrste armature glede na osnovo ter spajko in sposobnosti trdne medsebojne povezave armature in osnove. Trdnost povezave lahko povečamo z nanosi, ki so sorodni enemu ali obema partnerjema. Pri nanosu bakra na nerjavno jeklo je ta mejna površina šibko mesto. Z difuzijskim žarjenjem se trdnost izboljša.

## 6 Literatura

- <sup>1</sup> G. R. van Houten: A survey of the bonding of cermets to metals. *Welding Journal*, 12, 1958, 558s-569s
- <sup>2</sup> A. G. Foley, D. J. Andrews: Joining ceramics to metals by brazing. DVS-GmbH, Düsseldorf, *Berichte Band*, 148, 1992, 258-263
- <sup>3</sup> Y. Nakao et al.: Brazing of aluminium nitride to copper. DVS-GmbH, Düsseldorf, *Berichte Band*, 148, 1992, 63-67
- <sup>4</sup> K. Sasabe: Brazing of ceramic turbocharger rotor. DVS-GmbH, Düsseldorf, *Berichte Band*, 125, 1989, 164-167
- <sup>5</sup> L. Dorn et al.: Strength behaviour of ceramic-metal brazed joints with nickel interlayers at room temperature and at 600°C. *Schweissen und Schneiden*, 3, 1993, E44-E46 in 140-145
- <sup>6</sup> E. Lugscheider et al.: The use of interlayers for the relaxation of stresses in active brazed silicon nitride-steel joints. *Schweissen und Schneiden*, 2, 1995, E22-E25 in 97-107
- <sup>7</sup> Z. Mirski: Methods for improving mechanical properties of brazed joints with sintered carbides. DVS-GmbH, Düsseldorf, *Berichte Band* 125, 1989, 145-148
- <sup>8</sup> Z. Mirski: Kompozit brazed joints with sintered carbides. DVS-GmbH, Düsseldorf, *Berichte Band* 148, 1992, 174-177
- <sup>9</sup> C. T. Ho, D. D. L. Chung: Carbon fiber reinforced tin lead alloy as a low thermal expansion solder perform. *Journal of materials research*, 6, 1990, 1266-1270
- <sup>10</sup> C. T. Ho: Carbon fiber reinforced tin-lead alloy composites. *Journal of materials research*, 8, 1994, 2144-2147
- <sup>11</sup> J. Cao, D. D. L. Chung: Carbon fiber silver - copper brazing filler composites for brazing ceramics. *Welding Journal*, 1, 1992, 21s-24s
- <sup>12</sup> H. Zhuang et al: Wide gap brazing of stainless steel with nickel base brazing alloys. *Welding in the world*, 24, 1986, 9/10, 201-208
- <sup>13</sup> E. Lugscheider et al.: Wide gap brazing of pipelines systems. *Pipeline technology conference*, Oostende (Belgium), 15-18 October 1990, 8.21-8.28
- <sup>14</sup> V. N. Radzievsky, L. N. Baranova: Special features of formation of a brazed joint in wide gaps with a filler when vacuum brazing steel. *Welding International*, 4, 1991, 307-309
- <sup>15</sup> V. Radzievsky, K. Wittke: High temperature brazing a large steel structures with wide braze gap. *Schweissen und Schneiden*, 11, 1992, E199-E201 in 603-605
- <sup>16</sup> T. Yoshida, H. Ohmura: High-impact strength brazed joints in steel. *Welding Journal*, 10, 1986, 268s-272s
- <sup>17</sup> B. Zorc, L. Kosec: Izboljšanje mehanskih lastnosti spajkanih spojev s kompozitno spajko. *Kovine, zlitine, tehnologije*, 1-2, 1995, 350-353
- <sup>18</sup> B. Zorc: Načini povišanja mehanskih lastnosti spajkanih spojev. *Varilna tehnika*, 1, 1995, 3-10
- <sup>19</sup> B. Zorc, L. Kosec: Kompozitni spajkani spoji. *Kovine, zlitine, tehnologije*, 1-2, 1996, 125-130