

Kompozitni spajkani spoji

Composite Brazed Joints

B. Zorc¹, Inštitut za varilstvo, Ljubljana

L. Kosec, FNT, Odsek za metalurgijo in materiale, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1995-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1995-12-22

Kompozitne spajke izboljšajo mehanske lastnosti spajkanih spojev. Način vstavljanja armature v spajkani spoj kovina-kovina omogoča hitro izolacijo evtektika v spoju. Armatura se zaradi mikrostrukturne spremembe evtektika v trdno raztopino močnejše poveže z osnovnim materialom. Značilen spajkani spoj z vstavljanjem armature izgine. V članku so opisani rezultati raziskav spajkanja nerjavnih in nizkoogljicnih jekel ter bakra.

Ključne besede: armirani spajkani spoj, izolacija evtektika, sprememba evtektika v trdno raztopino, mikrostrukturno homogenejša povezava armature z osnovo

Composite brazing filler metals improve mechanical properties of brazed joints. The manner of armour insertion into the metal-to-metal brazed joint permits a quick isolation of eutectic in the joint. The armour joints more strongly to the parent metal due to the change of eutectic microstructure into a solid solution. With the armor insertion, the characteristic brazed joint disappears. The article describes results of studies on brazing of stainless and low-carbon steels and of cooper.

Key words: armoured brazed joint, eutectic isolation, eutectic change into solid solution, microstructurally more homogeneous joining of the armor to the parent metal

1 Uvod

Armiranje oziroma izdelava kompozitnih spajkanih spojev je znano že iz tridesetih let, ko pojma armiranje in kompozit v svoji izvorni pripadnosti nista bila poznana.

Kompozitne spajke so nastale takrat, ko so se pojavile sintrane karbidne trdine, iz katerih so začeli izdelovati rezilna orodja. Še bolj se je njihova uporaba razširila z razvojem novih keramičnih materialov. Pri spajkanju karbidnih trdin in keramike s kovino, pa tudi pri medsebojnem spajkanju keramike, se v spoju velikokrat pojavijo razpoke, ki so posledica različnih temperaturnih razteznosti. Nevšečnost tega pojava lahko zmanjšamo na več načinov, med drugim tudi z dodatkom duktilne kovine¹⁻⁷ ali z dodatkom kovinskih in nekovinskih materialov z majhno temperaturno razteznostjo^{1,5-8} v spajko oziroma spajkani spoj. Posebnost je tudi, da se v spajko dodani material med spajkanjem ne tali.

Pri spajkanju kovinskih materialov so malokrat uporabili kompozitno spajko. Spajke kompozitne narave so bile uporabljene pri spajkanju v široki reži (wide gap brazing), kjer so v spajko dodali kovinski prah, ki se med procesom spajkanja ni stalil⁹⁻¹⁹. Nekatere takšne spajke imajo značaj umetno ustvarjenih podedvektičnih zlitin (nikljeve spajke z dodatkom prahu nikljevih zlitin ali nerjavnih jekel). Druge imajo značilno kompozitno naravo (npr. bakrena spajka z dodatkom jeklenega prahu). Mehanske lastnosti spojev so odvisne od interakcije med spajko in dodanim prahom, pa tudi med osnovnim materialom. Prav tako vplivajo tudi lastnosti dodanega prahu.

Dosedanje raziskave armiranih spajkanih spojev so pokazale, da v splošnem izboljša njihove mehanske lastnosti.

O uporabi armature pri spajkanju kovinskih materialov ni literaturnih podatkov, vendar pa ima metoda realne možnosti za izdelavo spajkanih spojev z dobrimi in tudi načrtovanimi lastnostmi.

V mikrostrukturi večine spajk je, ali prevladuje evtektik. Nekatere so zelo krhke. Z različnimi armaturami (kemična sestava in geometrija) lahko izboljšamo posamezno ali skupaj več pomembnih lastnosti spajkanih spojev. To so žilavost, odpornost proti nastajanju in širjenju razpoke, trdnost itd.

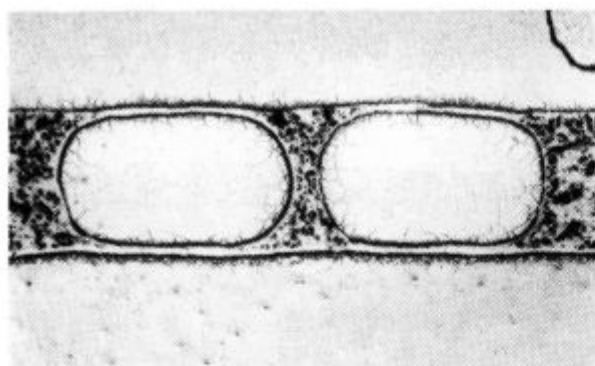
Idealen spoj je tak, da se armatura poveže z obema spajkanima deloma. To pomeni, da med osnovnim materialom in armaturo ni več dodatnega materiala - spajke. Jasno je, da je za to potrebno, glede na osnovni material, izbrati ustrezne spajke in armature.

V ta namen so bile prvič pri nas opravljene raziskave na tem področju.

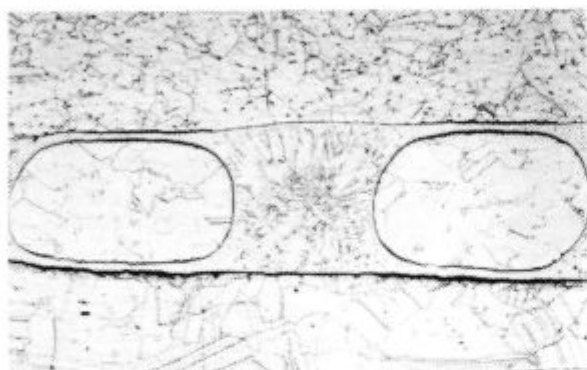
2 Opis poskusov

Raziskovali smo spajkanje nerjavnega jekla 18Cr/8Ni z nikljevim spajkami B-Ni1 (74% Ni; 14% Cr; 4,5% Fe; 4,5% Si; 3% B; 0,75% C), B-Ni5 (71% Ni; 19% Cr; 10% Si; ≤0,1% C), B-Ni7 (77% Ni; 13% Cr; 10% P; ≤0,1% C) in srebrovo spajko neznane kemične sestave. Za armiranje smo uporabili žičke in pletene mrežice iz nerjavnega jekla podobne sestave. Spajkali smo v peči v zaščitni atmosferi argona (nikljeve spajke) in s plamenskim postopkom (srebrna spajka).

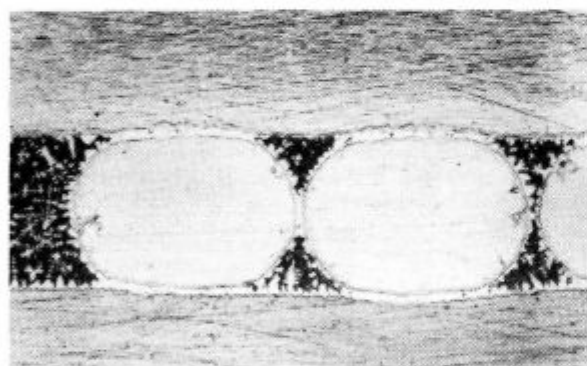
¹ Mag. Borut ZORC, dipl.inž.met.
Inštitut za varilstvo
1000 Ljubljana, Ptujška 19



a) spajka B-Ni1 ($T_s = 1100^\circ\text{C}$)

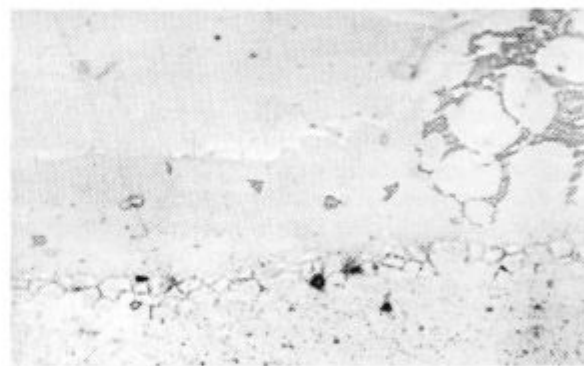
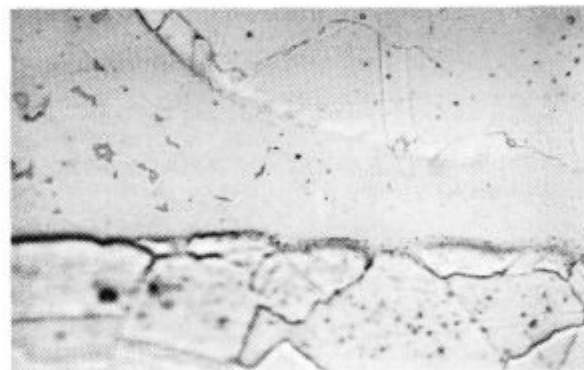
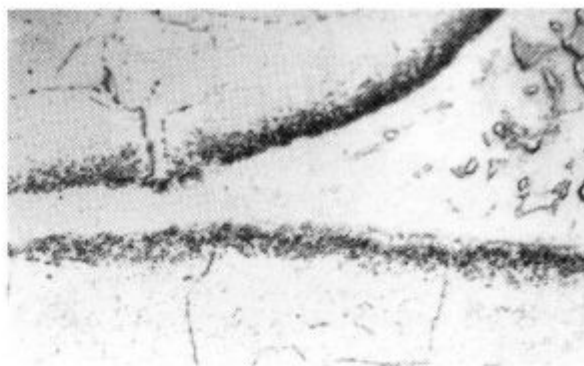


b) spajka B-Ni5 ($T_s = 1200^\circ\text{C}$)



c) spajka B-Ni7 ($T_s = 1100^\circ\text{C}$)

Žičke v spajkani reži (povečava 40 x)
wires in brazed gap (Magn.: 40 x)



reža med žičko in osnovo (povečava 400 x)
gap between the wire and parent metal (Magn.: 400 x)

Slika 1: Armiranje z nikeljevo spajko narejenih spojev (osnova in žice: nerjavno jeklo 18Cr/8Ni)
Figure 1: Armoured brazed joints, made by nickel brazing filler metals (parent metal and wires: stainless steel type 18Cr/8Ni)

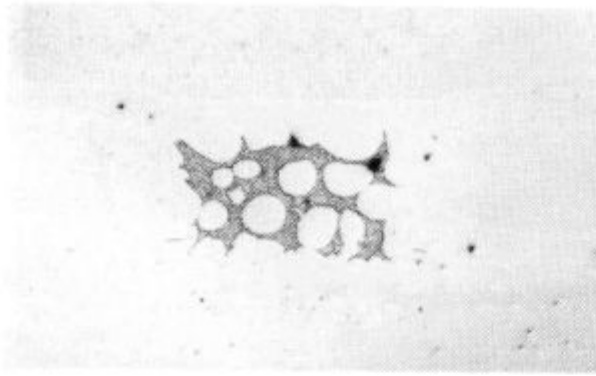
Baker smo spajkali s spajkami L-CuP7 (93% Cu; 7% P), L-Ag5P (89% Cu; 5% Ag; 6% P) in L-Ag15P (80% Cu; 15% Ag; 5% P). Za armiranje smo uporabili žice iz bakra. Spajkali smo s plamenskimi postopkom.

Maloogljčno jeklo smo spajkali s srebrovo spajko. Za armaturo smo uporabili mrežico iz maloogljčnega jekla in nerjavnega jekla 18 Cr/8Ni. Spajkali smo s plamenskimi postopkom.

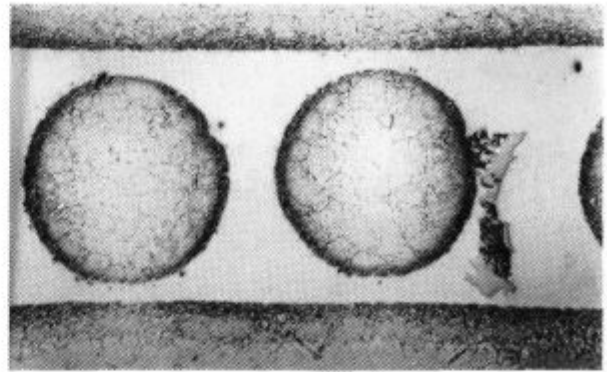
Namen raziskav je pokazati možnost mikrostrukturno homogene povezave armature z osnovnim materialom ter s tem

izolirati ali popolnoma odpraviti eutektik iz spajkane reže. Proces poteka pri temperaturah, ko je spajka staljena. Imenuje se TLP proces (transient liquid phase)²⁰. Znano je, da je proces možno kontrolirati s temperaturo in časom spajkanja²⁰⁻²² ter s pritiskno silo^{23,24}. Odvisen pa je tudi od kemične sestave izbranih komponent. V splošnem to kažejo tudi preiskave spajkanja v širokih režah.

Ker gre za začetne preiskave, nismo merili vseh vplivnih parametrov. Spajkani spoji so bili metalografsko analizirani.

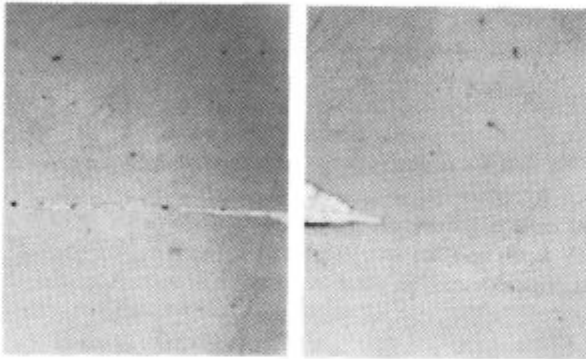


a) spajka BNi7
parametri spajkanja: $T = 1100^{\circ}\text{C}$, $t = 7$ ur
brazing parameters: $T = 1100^{\circ}\text{C}$, $t = 7$ ur

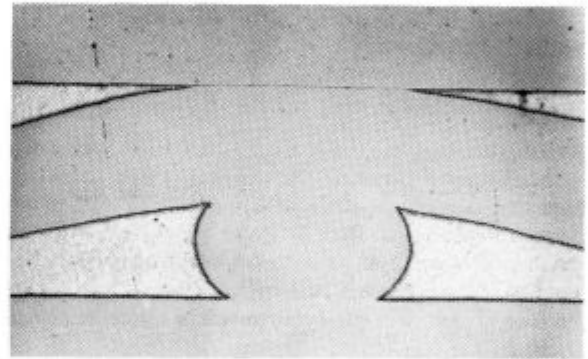


b) spajka BNi1

Slika 2: Mikrostruktura spoja po dolgotrajnem žarenju (pov.: 40 x)
Figure 2: Microstructure of brazed joints after long time annealing (Magn.: 40 x)

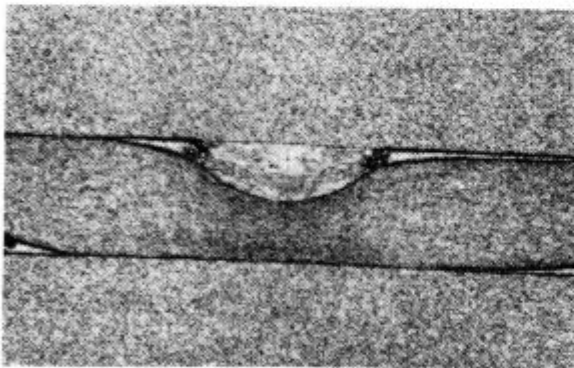


a) stik žička-osnova (pov. 500x)
Contact between the wire and parent metal (Magn.: 500 x)

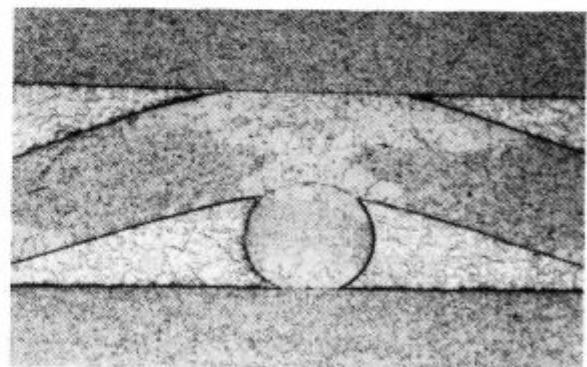


b) mrežica v reži (pov. 40x)
wire-mesh in the gap (Magn.: 40 x)

Slika 3: Armiranje s srebrovo spajko spajkanega spoja (osnova in mrežica: nerjavno jeklo 18Cr/8Ni)
Figure 3: Armoured brazed joint, made by silver brazing filler metal (parent metal and wire-mesh: stainless steel type 18Cr/8Ni)

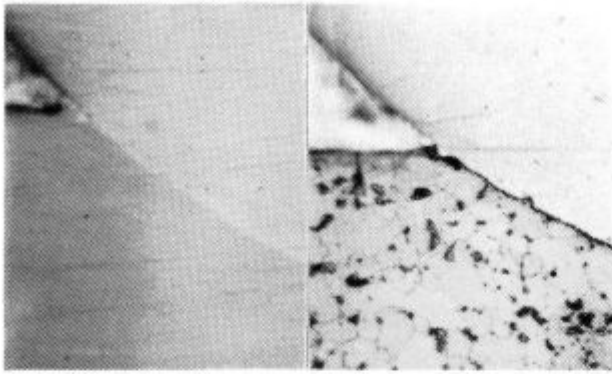


a) velika sila
high pressure

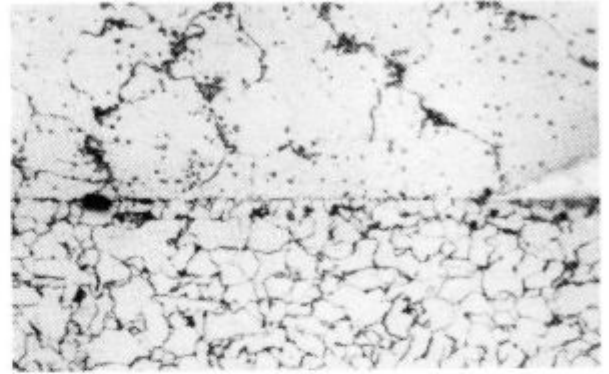


b) majhna sila
small pressure

Slika 4: Armiranje s srebrovo spajko narejenih spojev (pov. 40 x) (osnova in mrežica: nizkoogljikovo jeklo)
Figure 4: Armoured brazed joints made by silver brazing filler metal (Magn.: 40 x) (parent metal and wire-mesh: structural steel)



a) žička: nerjavno jeklo tipa 18 Cr/8Ni osnova: nizkoogljikovo jeklo
wire: stainless steel type 18Cr/8Ni parent metal: structural steel



b) žica in osnova: nizkoogljikovo jeklo
wire and parent metal: structural steel

Slika 5: Mikrostruktura stika med žičko in osnovo (pov. 500 x)

Figure 5: Microstructure of contact between the wire and the parent metal (Magn.: 500 x)

3 Rezultati in diskusija

3.1 Spajkanje nerjavnega jekla z nikljevim spajkami

Raziskave spojev nerjavnih jekel z nikljevim spajkami z uporabo armature iz mrežice ali žic nerjavnega jekla kažejo, da s stiskanjem proces poteče že v nekaj minutah (5 - 10 minut) na temperaturi spajkanja (slika 1). Žičke so povezane z osnovo s trdno raztopino, ne glede na vrsto spajke. Pri spajki B-Ni1 je v osnovi ob reži pas drobnih boridov²⁵.

Pri tesnem stiku se medsebojno povežejo s trdno raztopino tudi žičke.

Pritisna sila ima pri procesu ključno vlogo, saj z njo kontroliramo širino reže in s tem hitrost procesa. Čim ožja je reža, tem hitreje poteče sprememba mikrostrukture spajke pri določeni temperaturi.

Po ustrezno dolgem žarenju lahko evtektik popolnoma izgine (slika 2 b), kar kontroliramo tudi z gostoto armature. Pri večjih razdaljah med žicami v spoju še ostane evtektik.

V žičkah in osnovi ob reži so pri uporabi spajke B-Ni1 precipitirani boridi.

3.2 Spajkanje nerjavnega jekla s srebrovo spajko

Pri spajkanju nerjavnega jekla s srebrno spajko in z armaturo iz nerjavnega jekla ni značilnega TLP procesa. Vzrok temu je nekompatibilnost uporabljenih materialov.

Pri zelo tesnem stiku lahko nastane difuzijski spoj med žico in osnovo (slika 3).

Na slikah 3 b je vzdolžni stik med žičko in osnovo, v katerem je še vedno srebrova spajka. To prikazuje pri večji povečavi slika 3 a, levo.

Na prečnem stiku žice in osnove je viden difuzijski spoj (slika 3 a, desno). Difuzijsko sta medsebojno zavarjeni tudi žici.

3.3 Spajkanje maloogljičnega jekla s srebrovo spajko

Tudi spajkanje maloogljičnega jekla s srebrovo spajko in z armaturo iz maloogljičnega in nerjavnega jekla 18Cr/8Ni kaže,

da ni značilnega procesa TLP. Vzrok temu je nekompatibilnost uporabljenih materialov.

Pritisna sila omogoča tesen stik armature z osnovo, tako da lahko med njima nastane difuzijski spoj (slika 4).

Na sliki 4 a je armirani spoj na maloogljičnem jeklu, narezan s srebrovo spajko in z veliko pritisno silo. Vstavljena mrežica je iz maloogljičnega jekla.

V žicah na stiku zelo naraste kristalno zrno, kar je posledica pritisne sile, ki je vzrok deformaciji in njej sledeči rekristalizaciji.

Difuzijski spoj med žico in osnovo prikazuje slika 5.

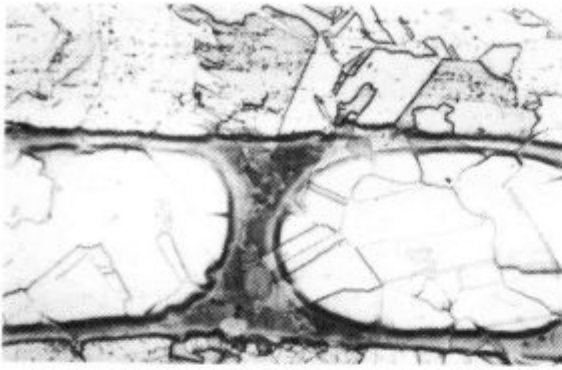
Pri uporabi žice iz maloogljičnega jekla nastane difuzijski spoj najverjetneje tako, da preostala spajka difundira po kristalnih zrnih v jeklo. Za armaturo iz nerjavnega jekla bomo to še preverili.

3.4 Spajkanje bakra s spajkami Cu-P

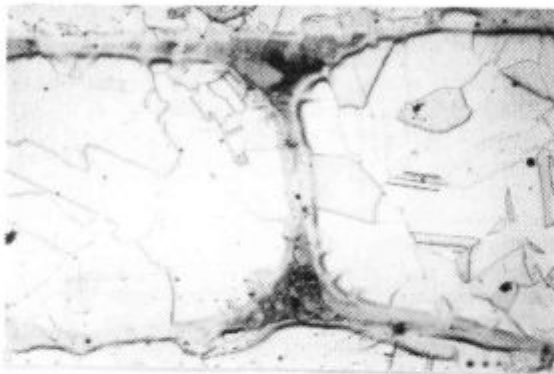
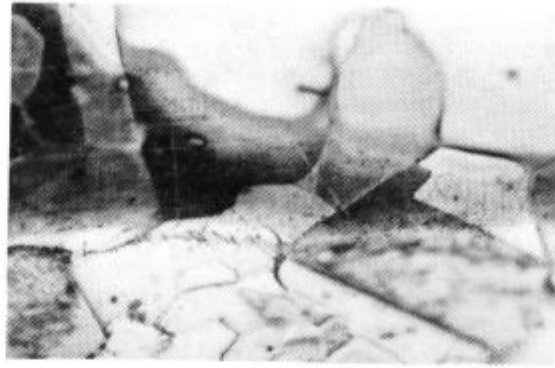
Raziskave spajkanja bakra z različnimi spajkami Cu-P z armaturo iz bakra kažejo, da je z uporabo sile proces končan v nekaj minutah (največ do 5 minut) pri temperaturi spajkanja (slika 6).

Žice so povezane z osnovo s trdno raztopino, ne glede na vrsto spajke. Na slikah 6a in 6b sta povezani žici z osnovo z dobro vidno homogenizacijo stika. Na sliki 6c tega še ni opaziti. Z vseh slik je razvidna tudi medsebojna povezava dveh žičk s trdno raztopino.

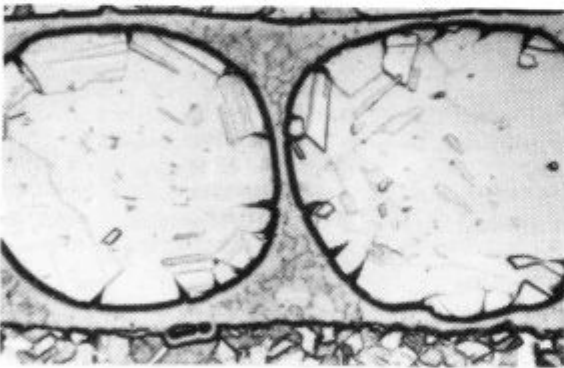
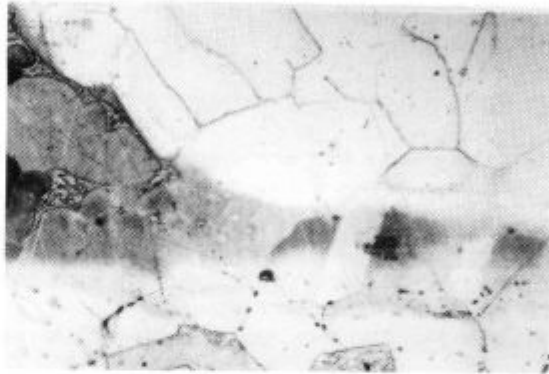
Vpliv pritisne sile na mikrostrukturo spoja je očiten. Spoj, narezan s spajko L-CuP7, je bil podvržen veliki sili med spajkanjem. Žice so sploščene, reža je ožja, celotna spajka pa je spremenjena v trdno raztopino. Podobno prikazuje tudi slika 6b, le da so tu še polja evtektika. Očitno je bila temperatura spajkanja nižja ali pa čas spajkanja krajši v primerjavi z vzorcem s slike 6a. Majhna sila (slika 6c) omogoči spremembo mikrostrukture spajke med žičko in osnovo oziroma žičkama, če sta dovolj blizu skupaj. Večina spajke ima še vedno povezana polja evtektika.



a) spajka L-CuP7 (pov. 100 x)

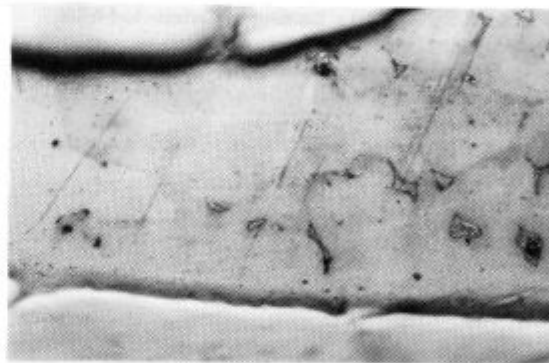


b) spajka L-Ag5P (pov. 125 x)



c) spajka L-Ag15P (pov. 100 x)

žičke v spajkani reži reža med žičko in osnovo
wires in brazed gap gap between the wire and parent metal



reža med žičko in osnovo (pov. 400x)
gap between the wire and parent metal (Magn. 400 x)

Slika 6: Armiranje spojev, izdelanih z različnimi spajkami Cu-P (osnova in žičke: baker)

Figure 6: Armoured brazed joints made by different types of Cu-P brazing filler metals (parent metal and wires: copper)

4 Sklepi

Rezultati opravljenih preiskav kažejo:

- da je pri določenih pogojih spajkanja možno dobiti mikrostrukturno homogeno povezavo armature in osnove ter s tem omejiti spajko v prostoru med elementi armature
- da se v primeru medsebojnih kombinacij uporabljenih materialov:
 - osnova in armatura iz nerjavnega jekla, nikljeva spajka katerekoli vrste
 - osnova in armatura iz bakra, spajka Cu-P katerekoli vrste vzpostavi povezava armature z osnovo s procesom TLP (transient liquid phase)
- da v primeru spajkanja jekel s srebrovo spajko nastane med armaturo in osnovo povezava, ki je zelo podobna difuzijsko zavarjenim spojem
- da lahko pričakujemo izboljšanje mehanskih lastnosti spajkanih spojev.

5 Literatura

- ¹ S. Cao, D. D. L. Chung: Carbon Fiber Silver-Copper Brazing Filler Composites for Brazing Ceramics. *Welding Journal*, 1992, 1, 21s-24s
- ² Z. Mirski: Composite Brazed Joints with Sintered Carbides. Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen, *DVS-Berichte* Bd. 148, Düsseldorf, 1992, 174-177
- ³ H. Ohmura et al.: The Effect of Columnar Microstructure on the Toughness of Carbon Steel Braze Joints. *Welding Journal*, 1992, 3, 63s-74s
- ⁴ H. Ohmura et al.: A Technique for Brazing Graphite/ Graphite and Stainless Steel/High-Carbon Steel Joints. *Welding Journal*, 1994, 10, 249s-256s
- ⁵ T. R. van Houten: A Survey of the Bonding of Cermets to Metals, *Welding Journal*, 1958, 12, 558s-567s
- ⁶ A. G. Folley, D. J. Andrews: Joining Ceramics to Metals by Brazing. Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen, *DVS-Berichte*, Bd. 148, Düsseldorf 1992, 258-263
- ⁷ *Welding Handbook*, 6 th ed., Section 3B. American Welding Society, 1972, 50.91 - 60.92
- ⁸ C. T. Ho, D. D. L. Chung: Carbon Fiber Reinforced Tin-Lead Alloys as a Low Thermal Expansion Solder Preform. *Journal of Materials Research*, 1990, 6, 1226-1270
- ⁹ P. R. Mobley, G. S. Hoppin: "Wide-Gap" Brazing for High Temperature Service. *Welding Journal*, 1961, 6, 610-617
- ¹⁰ J. W. Chasteen, G. E. Metzger: Brazing of Hastelloy X with Wide Clearance Butt Joints. *Welding Journal*, 1979, 4, 111s-117s
- ¹¹ E. Lugscheider et al.: Wide Joint Clearance Brazing with Nickel Base Filler Metals. *Welding Journal*, 1988, 2, 47s-51s
- ¹² H. Zhuang et al.: Le brasage fort de l'acier inoxydable avec jeu important et utilisant des metaux d'apport a base de nickel. *Le Soudage dans le Monde*, 1986, 9/10, 201-208
- ¹³ E. Lugscheider et al.: Wide Gap Brazing of Off-Shore Oil Field Pipes. Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen, *DVS-Berichte*, Bd. 125, Düsseldorf 1989, 10-15
- ¹⁴ E. Lugscheider, Th. Schittny: Wide Gap Brazing - a High Temperature Brazing Process for Joining Large Components. Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen, *DVS-Berichte*, Bd. 125, Düsseldorf, 1989, 93-98
- ¹⁵ Y. Nakao et al.: New Development of Transient Liquid Insert Metal Diffusion Bonding Using Alloying Powder. *Transaction of the Japan Welding Society*, 1992, 2, 20-25
- ¹⁶ V. N. Radziewskij, L. V. Baranova: Special Features of Penetration of a Brazed Joint in Wide Gaps with a Filler Metal when Vacuum Brazing Steel. *Welding International*, 1991, 4, 307-309
- ¹⁷ V. Radziewskij, K. Wittke: High Temperature Brazing of Large Steel Structures with Wide Braze Gaps. *Schweißen und Schneiden*, 1992, 11, E199-E201; 603-605
- ¹⁸ V. N. Radziewskij et al.: High Temperature Brazing in Vacuum with Wide Brazing Spacing-Gap. *Svaročnoe Proizv.*, 1988, 9, 28-29
- ¹⁹ V. N. Radziewskij et al.: High-Temperature Brazing in Vacuum of Tee Joints Having Large Fillet Made of Metal Powder. *Svaročnoe Proizv.*, 1991, 8, 5-6
- ²⁰ D. S. Duvall et al.: TLP* Bonding: a New Method for Joining Heat Resistant Alloys. *Welding Journal*, 1974, 4, 203-214
- ²¹ R. Johnson: The Use of TETIG Diagrams in HIGH Temperature Brazing. *Welding Journal*, 1981, 10, 185s-193s
- ²² E. Lugscheider, K. D. Partz: High Temperature Brazing of Stainless Steel with Nickel-Base Filler Metals B-Ni2, B-Ni5 and B-Ni7. *Welding Journal*, 1983, 6, 160-164
- ²³ H. D. Steffens et al.: The minimisation of Thermal Loading of Base Material by Modification of Brazing Process. *Zbornik referatov "Dani zavarivanja - Budva 86"*, 12-16 maj 1986, 247-251
- ²⁴ A. Rabkin, S. Pounds: Effect of Load on Brazing with Metglas MBF-2005 Filler Metal. *Welding Journal*, 1988, 5, 33-45
- ²⁵ B. Zorc: *Magistrsko delo*, FNT - VTO Montanistika, Odsek za metalurgijo, Univerza v Ljubljani, 199