

## Trdnostne lastnosti visokotemperaturno spajkanih spojev v vakuumu

### The Strength Properties of High Temperature Vacuum Brazed Joints

D. Kmetič, V. Leskovšek, J. Žvokelj, *Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, Ljubljana*

J. Gnamuš, *Železarna Ravne, Ravne na Koroškem*

*V vakuumski peči smo visokotemperaturno spajkali hitrorezno jeklo na konstrukcijsko jeklo. Kot dodajni material smo uporabili spajki izdelani na bazi Ni, Cr in Si in Cu. Vzorce smo istočasno toplotno obdelali. Določili smo strižno trdnost prekrivnega spoja in natezno trdnost čelnega spoja.*

*Ključne besede: Orodna jekla, visokotemperaturno spajkanje, mehanske lastnosti*

*High temperature brazed joints between HSS and structural carbon steel with simultaneous heat treatment were analyzed. Two brazing alloys based on Ni-Cr-Si and Cu were applied as filler metals. Shear strength of an overlap joint and the tensile strength of a butt joint were determined.*

*Key words: Tool steels, high temperatures vacuum brazing, mechanical properties*

#### 1 Uvod

Visokotemperaturno spajkanje poteka pri temperaturah nad 900°C. To je že področje austenitizacije orodnih jekel, zato lahko v istem ciklusu orodno jeklo spajkamo na konstrukcijsko jeklo in orodje istočasno toplotno obdelamo. Z izdelavo orodij po tej tehnologiji lahko nadomestimo do 70% dragega orodnega jekla s cenejšim konstrukcijskim jeklom. Postopek ima še druge prednosti, prihranek energije, deformacije orodij so po toplotni obdelavi zelo majhne, orodje je izdelano do končne faze in je potrebno le še brušenje, vrtnanje izvrtin za pritrditev orodja je v konstrukcijsko jeklo enostavno in tudi z ekološkega stališča je tehnologija neoporečna.

#### 2 Eksperimentalni del

Lastnosti spajkanega spoja in orodnega jekla so odvisne od temperaturnih in časovnih pogojev spajkanja in toplotne obdelave. Značilno za visokotemperaturno spajkanje je, da zelo hitro potekajo difuzijski procesi na meji med tekočo in trdno fazo (spajka/jeklo), ki vplivajo na izoblikovanje mikrostrukture vezne plasti. Trdnostne lastnosti visoko temperaturno, v vakuumu spajkanih spojev, so v veliki meri odvisne od mikrostrukturnih značilnosti vezne plasti.

Pri preiskavah smo uporabili hitrorezni orodni jekli BRM 2 (Č.7680) in OSV 1 (Č.9880) in konstrukcijsko jeklo Ck 15 (Č.1221). Za dodajni material smo uporabili dve spajki, ki jih izdeluje firma Microbraz Wall Colmonoy, z oznakama LM in 30, in sta izdelani na bazi Ni, Cr in Si in čisti Cu. Kemijska sestava jekel in spajk je podana v tabeli 1.

Največjo trdnost spajkanega spoja dosežemo s prekrivnim spojem, zato se ta vrsta spoja tudi največ uporablja. Prekritje je funkcija natezne trdnosti šibkejšega materiala in strižne trdnosti spajkanega spoja. Prekritje je

tako definirano z enačbo:

$$l = \frac{R_m d}{\tau}$$

kjer pomenijo:

$l$	dolžina prekritja v mm,
$R_m$	natezna trdnost šibkejšega materiala v $N/mm^2$ ,
$\tau$	strižna trdnost spajkanega spoja v $N/mm^2$ in
$d$	debelina spajkanih lamel v mm.

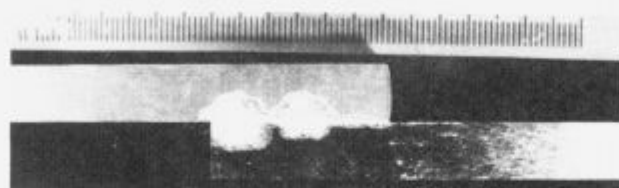
Oslabitev spoja zaradi napak pri spajkanju upoštevamo z varnostnim faktorjem. Tako dobimo za kovinske materiale z nizko natezno trdnostjo dolžino prekritja enako trikratni debelini, za materiale z visoko natezno trdnostjo pa šestkratni debelini spajkanih lamel. Za naše preiskave smo izdelali vzorce z enkratnim in štirikratnim prekritjem (slika 1). Tako obliko preizkušancev za določitev strižne trdnosti smo izbrali zato, da so bili preizkušanci v trgalnem stroju INSTRON dejansko le natezno obremenjeni.

Pri mehkem in trdem spajkanju čelnega spoja praviloma ne uporabljamo. Trdnosti visokotemperaturnih vakuumskih spojev so višje, tako, da to vrsto spoja v praksi lahko uporabimo. Trdnost spoja je odvisna od vrste spajke, mikrostrukturnih značilnosti vezne plasti in natezne trdnosti konstrukcijskega jekla. Preizkušane za natezni preizkus je prikazan na sliki 2.

Na vzorcih, spajkanih s prekrivnim spojem, z enkratnim prekritjem in dolžino prekritja enako trikratni debelini spajkanih lamel, smo naredili tudi upogibne preizkuse. Na spajkanem spoju robov na lamelah nismo posneli, zato so bili pogoji preizkušanja zelo ostri. Na uporabnih spojih morajo biti robovi, zaradi boljših trdnostnih lastnosti, posneti. Preizkušance smo obremenjevali na sredini spajkanega spoja s trnom premera 30 mm.

Tabela 1. Kemijska sestava jekel in spajk v odstotkih

	C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo	V	Co
BRM 2	0.89	0.35	0.29	0.018	0.018	4.2	6.3	4.9	1.8	-
OSV 1	1.42	0.31	0.38	0.012	0.017	4.4	6.5	3.4	4.8	4.9
Ck 15	0.14	0.27	0.32	0.007	0.012	0.1	-	-	-	-
LM	7% Cr, 4.5% Si, 3.0% Fe, 2.1% B, maks. 0.06% C, Ni ost.									
30	19% Cr, 10.2% Si, maks. 0.10% C, Ni ost.									
Cu	99.8% Cu									



Slika 1. Strižna preizkušanca z enkratnim in štirikratnim prekritjem.

Figure 1. Shear specimens with single and fourfold overlap.



Slika 2. Natezni preizkušaneč.

Figure 2. Tensile specimen.

Vzorci spajkane z dodatnim materialom LM in Cu smo spajkali pri temperaturi 1120°C, vzorce spajkane s spajko 30 pa pri temperaturi 1160°C. Vakuum med spajkanjem je bil 10<sup>-3</sup> mbar. Po kaljenju v toku dušika z absolutnim tlakom 5 bar smo vzorce dvakrat popuščali pri 550°C. Tako toplotno obdelano hitrorežno jeklo ima mikrostrukturo iz popuščenega martenzita in drobnih karbidov in trdoto od 63 do 64 HRC, trdota konstrukcijskega jekla s feritno perlitno bainitno mikrostrukturo pa je 145 HV in natezna trdnost od 490 do 510 N/mm<sup>2</sup>.

### 3 Rezultati preiskav

Podatki o vzorcih in strižne trdnosti nateznih preizkušanj so podani v tabeli 2. Iz rezultatov vidimo, da se je pri večini preiskušancev porušilo konstrukcijsko jeklo (slika 3). Strižna trdnost je odvisna od prekritja, enkratno ali štirikratno, in dolžine prekritja. Največja je pri enkratnem prekritju in dolžini prekritja enaki dvakratni debelini

Tabela 2. Strižne trdnosti prekrvnih spojev

Vzorec	Spajka	Prekritje	Dolžina prekritja	$\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )
A/1	LM	4 kratno	3 × d	> 30
A/2*	LM	4 kratno	3 × d	27
A/3	LM	4 kratno	6 × d	> 30
A/4*	LM	4 kratno	6 × d	18
A/5	LM	1 kratno	3 × d	> 71
A/6	LM	1 kratno	2 × d	> 210
B/1	30	4 kratno	3 × d	> 30
B/2*	30	4 kratno	3 × d	27
B/3	30	4 kratno	6 × d	> 20
B/4	30	1 kratno	3 × d	> 60
C/1	Cu	4 kratno	3 × d	> 32
C/2	Cu	4 kratno	6 × d	> 62
C/3	Cu	1 kratno	3 × d	> 66
C/4	Cu	1 kratno	2 × d	> 205

\* vzorci so se porušili po spajkanem spoju



Slika 3. Strižna preizkušanca s štirikratnim prekritjem po nateznem preizkušanju.

Figure 3. Shear specimens with fourfold overlap after the tensile test.

spajkanih lamel. Nekoliko višje trdnosti smo dobili pri vzorcih spajkanih s spajko LM.

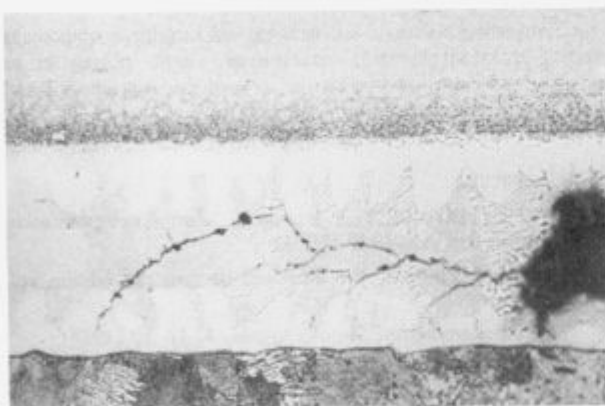
Trdnosti čelnih spojev so visoke in so le malo nižje od natezne trdnosti, ki jo ima konstrukcijsko jeklo pri tej toplotni obdelavi, ki ustreza kaljenju in popuščanju hitroreznega jekla (tabela 3). Preiskušanci nimajo praktično nobenega raztezka in kontrakcije.

**Tabela 3.** Natezne trdnosti čelno spajkanih preizkušancev

Vzorec	Spajka	$R_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )
A/8	LM	330	445
C/7	Cu	340	475
C/8	Cu	325	345 (napaka v vezni plasti)

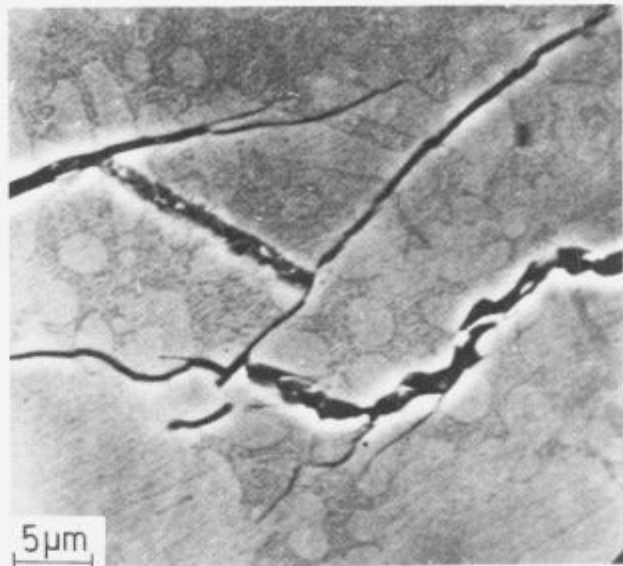
Trdnostne lastnosti upogibnih preizkušancev so odvisne od debeline lamel spajkanega vzorca in načina obremenjevanja. Vzorci izdelani iz lamel debeline 10 mm so se porušili po spajkanem spoju, ne da bi se lamele deformirale. Pri vzorcih iz lamel debeline 5 mm pa je pomembno kako vzorec obremenjujemo. V primeru, ko smo s trnom obremenjevali lamelo iz konstrukcijskega jekla, se je ta sprva upogibala, pri določeni obremenitvi pa je prišlo do porušitve v vezni plasti spajke. Pri obremenjevanju lamele hitroreznega jekla, se lamela iz konstrukcijskega jekla upogne za 90°, v vezni plasti pa nismo opazili nobenih znakov porušitve.

Spajkane spoje mehanskih preizkušancev smo metalografsko pregledali. Na vzorcih s prekrovnim spojem, ki so se porušili po konstrukcijskem jeklu, smo v vezni plasti opazili le posamezne mikrorazpoke. Na vzorcih, ki so se porušili po vezni plasti, smo v vseh primerih opazili mikroporozna področja, ki so iniciali za nastanek mikrorazpok. Mikrorazpoke in razpoke, po katerih je prišlo do porušitve, potekajo na vzorcih spajkanih s spajkama LM in 30, po euteklični fazi, ki je na sredini vezne plasti (sliki 4 in 5). Na vzorcih, spajkanih s tema dodajnim materialoma, je ogljik iz orodnega jekla difundiral v konstrukcijsko jeklo v taki meri, da je mikrostruktura konstrukcijskega jekla ob meji s spajko perlitno bainitna. Ogljik se v bakru ne topi, zato difuzija ogljika preko bakra ni mogoča in konstrukcijsko jeklo ima v področju ob vezni plasti feritno perlitno bainitno mikrostrukturo.

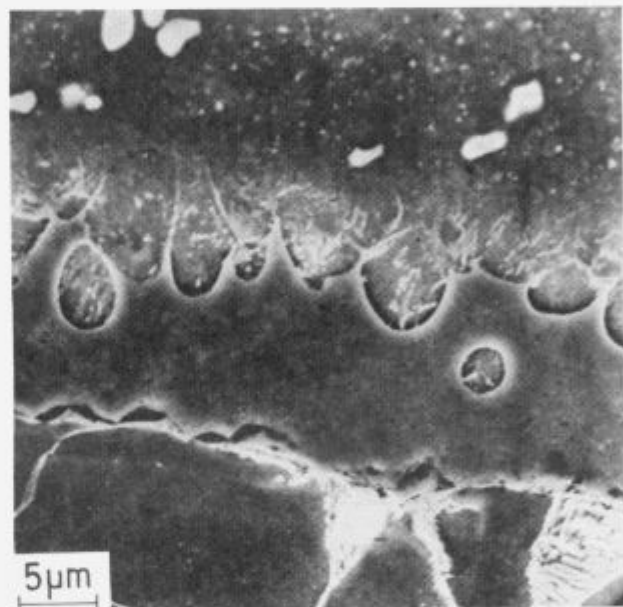


**Slika 4.** Inicial za nastanek mikrorazpok, ki potekajo po euteklični fazi, so mikroporozna mesta — spajka LM (pov. 200×).  
**Figure 4.** Initiation spot of microcracks progressing through the eutectic phase are the microporous regions — LM brazing alloy (magn. 200 times).

Na vzorcih, spajkanih s Cu, so med preizkušanjem nastajale razpoke v vezni plasti na meji med dodajnim materialom in konstrukcijskim jeklom (slika 6). V temu področju so se porušili tudi natezni preizkušanci. Zanimivo pa je, da smo pri natezih preizkušancih opazili, da lahko poteka prelom deloma tudi po konstrukcijskem ali orodnem jeklu.

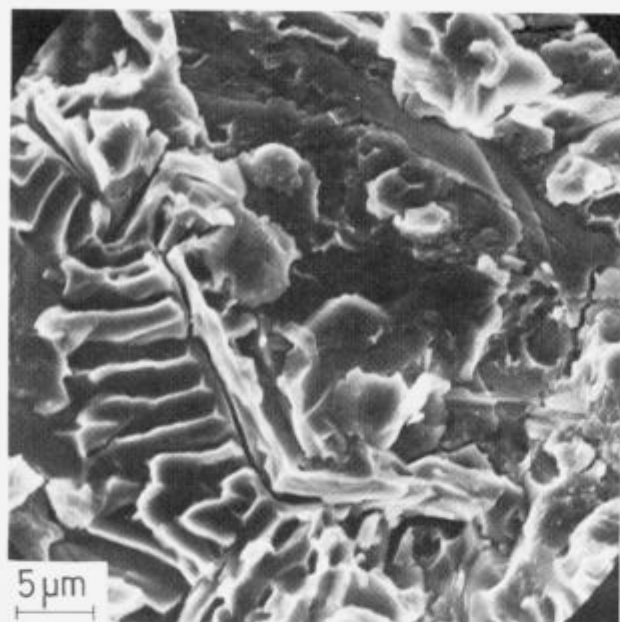


**Slika 5.** Mikrorazpoke potekajo po euteklični fazi — spajka LM.  
**Figure 5.** Microcracks progressing through the eutectic phase — LM brazing alloy.

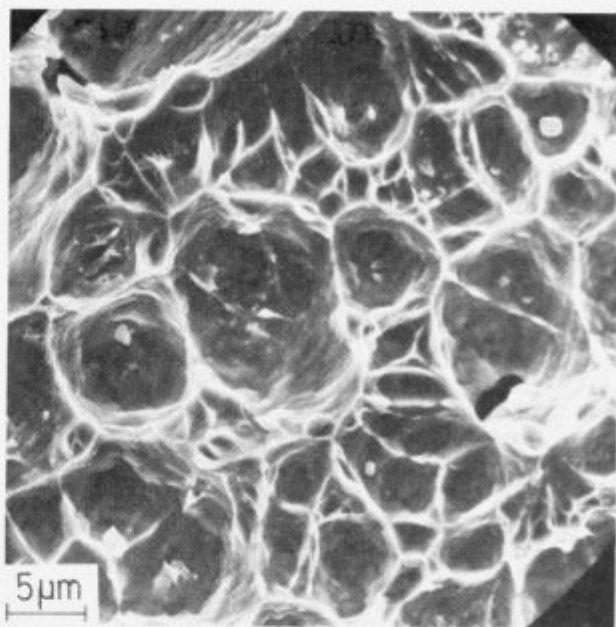


**Slika 6.** Mikrostruktura vezne plasti na preizkušancu BRM 2-Cu-Ck 15.  
**Figure 6.** Microstructure of bonding layer in BRM 2-Cu-Ck 15 specimen.

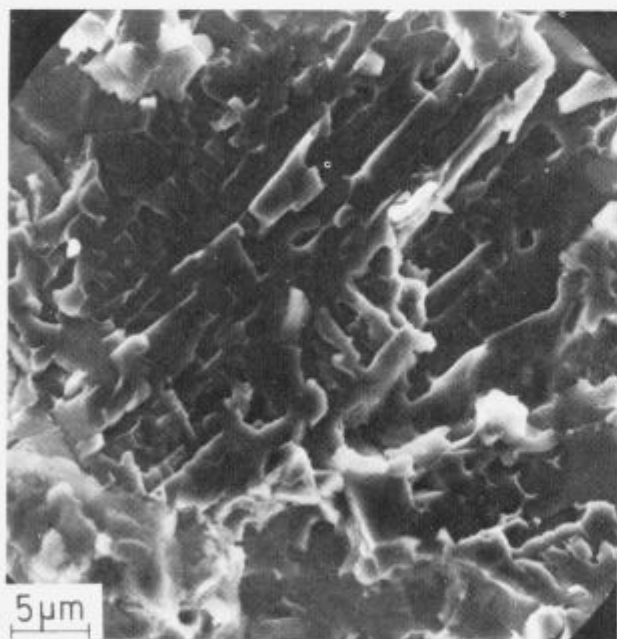
Morfološke značilnosti prelomnih površin so zelo različne. Na vzorcih spajkanih s spajko LM se dobro ločijo prelomne površine, ki potekajo preko dendritnih kristalov, od tistih, ki potekajo preko eutektika in  $\gamma$  faze (slika 7). Krhke cepilne prelomne površine, ki potekajo preko eutektika in  $\gamma$  faze, so značilne tudi za preizkušance spajkane s spajko 30. Izrazitih dendritov na teh preizkušancih nismo opazili, opazi pa se neka usmerjenost prelomnih površin (slika 8). Prelomne površine vzorcev spajkanih s Cu potekajo večinoma po dodatnem materialu in so žilave. V jamicah se opazijo drobni vključki bakrovega oksida (slika 9).



Slika 7. Prelom preko eutektika in  $\gamma$  faze — spajka LM.  
Figure 7. Fracture through the eutectic and  $\gamma$  phase — LM brazing alloy.



Slika 9. Prelomna površina vzorca spajkanega s Cu — v jamicah so vključki bakrovega oksida.  
Figure 9. Fracture surface of the specimen brazed with Cu — inclusions of copper oxide are visible in dimples.



Slika 8. Prelomna površina preizkušanca spajkanega s spajko 30.  
Figure 8. Fracture surface of the specimen brazed with brazing alloy 30.

#### 4 Zaključek

Trdnostne lastnosti visokotemperaturno vakuumsko spajkanih spojev smo določili na prekravno in čelno spajkanih preizkušancih. Preizkušance smo izdelali iz hitroreznih jekel BRM 2 in OSV 1 in konstrukcijskega jekla Ck 15. Spajkali smo jih z dodajnim materialoma, izdelanimi na bazi Ni, Cr in Si in s Cu.

Strižna trdnost prekravnega spoja je pri dolžini prekritja enaki 3 do 6 kratni debelini spajkanih lamel tako visoka, da se pri ustrezno izdelanih spojih, poruši konstrukcijsko jeklo.

Trdnosti čelno spajkanih preizkušancev so za to vrsto spoja zelo visoke. Do porušitve pride po spajkanem spoju, natezne trdnosti pa so le malo nižje od trdnosti konstrukcijskega jekla, toplotno obdelanega pri pogojih, ki ustrezajo hitroreznim jeklom.

Trdnostne lastnosti so odvisne od kvalitete spajkanega spoja, mikrostrukturnih značilnosti vezne plasti, ki so odvisne od pogojev spajkanja in toplotne obdelave in od mehanskih lastnosti šibkejšega materiala.

#### 5 Literatura

- <sup>1</sup> E.P. Gradiševskij, L.K. Borusevič, Žurnal neograničeskoj himiji, 8, 1915–1920 (1963)
- <sup>2</sup> Metals Handbook, Welding and Brazing, 8<sup>th</sup> edition, vol. 6
- <sup>3</sup> R. Blickensderfer, Metal Progres, 4, 47–50 (1988)
- <sup>4</sup> Z.H. Guo, N. Ridley, Science and Technology, 3, 945–953 (1987)
- <sup>5</sup> H. Mizuhura, Metal Progres, 2, 53–55 (1987)
- <sup>6</sup> G. Aggen, R.A. Long, E.E. Reynolds, Welding research supplement, 7, 366–372 (1957)
- <sup>7</sup> M.D. Bellware, The welding journal, 7, 683–691 (1958)
- <sup>8</sup> N.F. Kazakov: Diffusion Bonding of Materials, Mir Publishers, Moscow, 1985
- <sup>9</sup> D. Kmetič, J. Gnamuš, F. Vodopivec, B. Ralič, Zbornik XXXIX. posveta o metalurgiji in kovinskih gradivih, 157–168, Portorož 1988
- <sup>10</sup> D. Kmetič, V. Leskovšek, F. Vodopivec, J. Gnamuš, Zbornik XL. posveta o metalurgiji in kovinskih gradivih, 175–182, Portorož 1989

- <sup>11</sup> D. Kmetič, V. Leskovšek, J. Gnamuš, F. Vodopivec, G. Rihar, Spajanje orodnih jekel na konstrukcijska jekla v vakuumski žarilni peči, poročilo MI, Ljubljana 1989
- <sup>12</sup> V. Leskovšek, D. Kmetič, J. Gnamuš, G. Rihar: Visoko temperaturno vakuumsko spajkanje orodnih jekel na konstrukcijska jekla z istočasno toplotno obdelavo v vakuumski peči, poročilo MI, 1988
- <sup>13</sup> E. Ludscheider, T. Cosack, *Welding research*, 10, 215–221 (1988)
- <sup>14</sup> J.J. Ramon, S.F. Dirnfeld, *Welding journal*, 10, 19–21 (1988)
- <sup>15</sup> V. Leskovšek, D. Kmetič, J. Gnamuš, G. Rihar, *Vuoto*, 2, 515–518 (1990)