

Mehanske lastnosti spajkanih spojev

Mechanical Properties of Brazed Joints

B. Zorc¹, 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

Raziskali smo mehanske lastnosti in analizirali mikrostrukturo spajkanih spojev z ogljikovim konstrukcijskim jeklom (spajka L-Ag40Cd), nerjavnim jeklom vrste 18-8 (spajki L-Ag40Cd in L-Ni7), z bakrom in medjo (spajka L-CuP7). Primerjali smo mehanske lastnosti spajkanih spojev in osnovnih materialov, ki so bili izpostavljeni temperaturnemu ciklu spajkanja.

Ključne besede: spajkanje, tehnologija spajkanja, talilo, spajkani spoj, mehanske lastnosti

A study of mechanical properties and an analysis of microstructure of brazed joints with carbon structural steel (brazing filler material: L-Ag40Cd), stainless steel 18-8 (brazing filler metals: L-Ag40Cd and L-Ni7), copper and brass (brazing filler metal: L-CuP7) were made. A comparison of the mechanical properties of the brazed joints and of those of the parent metal subject to thermal cycles during brazing was made.

Key words: brazing, brazing technology, brazing flux, brazed joint, mechanical properties

1 Uvod

Mehanske lastnosti spajkanih spojev so odvisne od različnih parametrov: širine spajkane reže, vrste in mehanskih lastnosti osnovnega materiala in spajke, talila, zaščitne atmosfere, razmer pri spajkanju (temperatura, čas), hrupavosti površine, oblike spoja itd.^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13}

Zelo pomembna je tudi tehnika spajkanja. Glede na mesto dodane spajke razlikujemo naslednje tehnike^{4,8,13,14,15}:

- z dodatkom spajke na mesto spoja po celotnem stiku (folija, pasta, platiranje)
- z dodatkom spajke na mesto spoja, vendar le na del stične površine (folija, pasta, žičke, platiranje)
- z dodatkom spajke ob spoju ali v pripravljene ure (žička, pasta).

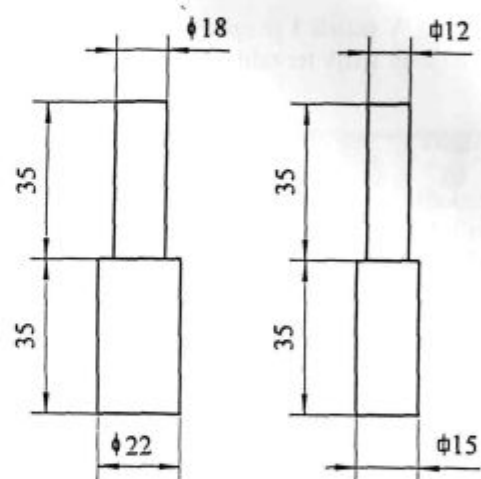
Vse tehnike omogočajo dobro zalitje spoja z minimalnimi napakami ali celo brez njih. Namen preizkusov je bil izdelati čimbolj popolne sočelne spajkane spoje, ki naj bi bili primerjalni za to tehnologijo.

2 Preizkusi

Za preizkuse smo uporabili različne osnovne materiale (elektrolizni baker, med CuZn39Pb2, avstenitno nerjavno jeklo 18 - 8, konstrukcijska jekla z 0,16 in 0,34% ogljika). Vzorci so bili okroglega in kvadratnega preseka. Dimenzije vzorcev so označene na **sliki 1**, uporabljeni tehniki spajkanja pa prikazani na **sliki 2**.

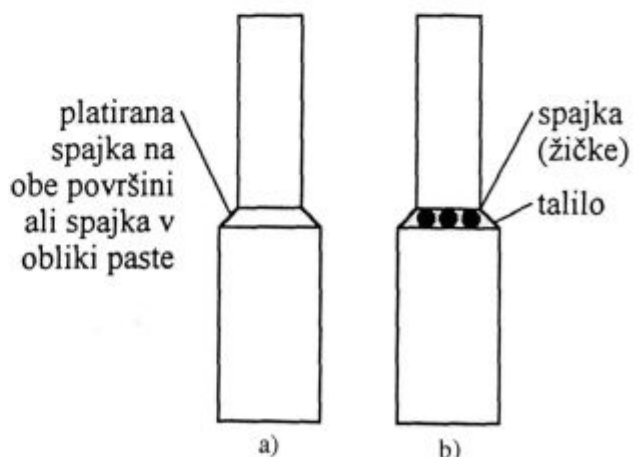
Spajkanci so bili brušeni z vodobrusnim papirjem št. 220 in nato pet minut jedkani v 10% H₂SO₄. Med dva kosa smo dali talilo, pri tehniki b) pa smo žičke spajke postavili prečno na smer brusnih raz. Spajkali smo s pla-

menom ali v peči z zaščitno mešanico H₂ + N₂ in brez kontrole spajkane reže, (reža, odvisna od mase zgornjega



Slika 1: Oblika vzorcev

Figure 1: Forms of brazed test pieces



Slika 2: Uporabljene tehnike spajkanja

Figure 2: Brazing techniques applied

¹ Mag. Borut ZORC
Institut za varilstvo
Pujska 19, 1000 Ljubljana

Tabela 1: Parametri spajkanja
Table 1: Brazing parameters

Material (Base metals)	Spajka (Filler metals)	Talilo (Flux)	Tehnika (Technique)	Temperatura spajanja (Brazing temperature)	Čas spajkanja** (Brazing time)
Elektrolizni baker	L-CuP7 (93 % Cu, 7 % P) žica ϕ 2 mm	/	plamensko b	750 °C	10 s
CuZn39Pb2	L-CuP7 žica ϕ 2 mm	F-SH1***	plamensko a in b	750 °C	10 s
Č. 4580	L-Ag40Cd žica 2 mm	F-SH1***	plamensko a in b	680 °C	10 s
	L-Ni7 - pasta (77%Ni, 13%Cr, 10 % P)	/	v peči a	1065 °C	5 min
navadno konstrukcijsko jeklo z 0,16 % in 0,3 % ogljika	L-Ag 40 Cd (40%Ag, 19%Cu, 21% Zn, 20%Cd) žica ϕ 2 mm	F-SH1	plamensko a in b	680 °C	10 s

** čas od stalitve spajke do prenehanja ogrevanja oziroma prehod skozi ogrevno komoro (the time between melting-down of brazing filler metal and termination of heating)

*** uporabljeni talili (fluxes applied): Institut za varilstvo in Degussa h special

dela vzorca). V **tabeli 1** je spisek spajkalnih parametrov in uporabljenih spajk ter talil.

3 Preiskave

Preiskali smo metalografske značilnosti spojev, natezno trdnost in žilavost osnovnega materiala ter spojev. Makroskopsko smo pregledali tudi prelomne površine spojev z namenom, da bi ugotovili obseg zalitja.

3.1 Metalografska preiskava spojev

Nekateri značilni spoji so prikazani na **sliki 3**. Najširše reže so bile dobljene pri spajkanju bakra in medu s spajko L-CuP7, znatno ožje pa pri spajkanju jekla s srebrovo in nikljevo spajko.

Mikrostruktura spoja se pri spajkanju bakra in medu z L-CuP7 posebej ne razlikuje. Le-ta je iz evtektika ($\alpha_{Cu} + Cu_3P$), ki je prikazan na fotografijah v sivi barvi, in zmesnih kristalov na osnovi bakra α_{Cu} (bolj ali manj okrogla bela polja). Trdna raztopina α_{Cu} je tudi na osnovnem materialu v obliki zveznega pasu, le v bakru je opaziti penetracijo spajke po kristalnih mejah.

Podoben je tudi spoj nerjavnega jekla z L-Ni7. Trdna raztopina na osnovi niklja α_{Ni} je izločena v mestoma prekinjenem valovitem pasu na osnovnem materialu. Spoj je sestavljen iz zmesnih kristalov na osnovi niklja α_{Ni} in evtektika ($\alpha_{Ni} + Ni_3P$). Po mejah osnovnega materiala pa je prednostna difuzija nekaterih sestavin spajke.

Mikrostruktura spojev pri konstrukcijskem in nerjavnem jeklu, izdelanih s spajko L-Ag40Cd, je zelo podobna. Dendriti, ki so trdna raztopina pretežno cinka v bakru, so obdani z evtektikom, ki ga tvorita fazi, bogati z

bakrom in cinkom ter srebrom in kadmijem¹⁶. Trdna raztopina baker - cink je predvsem ob meji z osnovo. Penetracije spajke ali difuzije posameznih elementov iz spajke v osnovo ni opaziti.

3.2 Mehanske lastnosti

Merili smo natezno trdnost in žilavost osnovnega materiala in spajkanih spojev. Osnovni material je doživel enak temperturni cikel kot spoji.

Žilavost osnovnega materiala smo preizkušali pri preizkušancih z V-zrezo, spajkane spoje pa brez nje. Preizkušanci za natezni preizkus so bili izdelani iz kombinacije jekel z 0,16% ogljika in jekla z 0,34% ogljika, žilavostni preizkušanci pa iz jekla z 0,16% ogljika.

Mehanske lastnosti smo merili na treh paralelah.

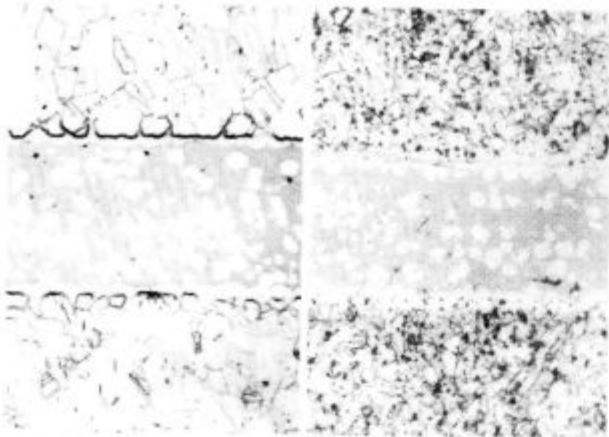
Pri elektroliznem bakru smo dobili enake vrednosti za natezno trdnost in raztezek osnovnega materiala in spajkanih vzorcev. Vzrok za to je pretrganje spajkanih vzorcev v bakru.

Preizkušanci drugih so se pretrgali v spoju. Prelom žilavostnih epruvt je potekal po spoju. To kažejo tudi zelo majhne žilavosti v primerjavi z osnovnim materialom.

Natezna trdnost osnovnega materiala se je po spajkanju zmanjšala, povečala pa sta se raztezek in žilavost.

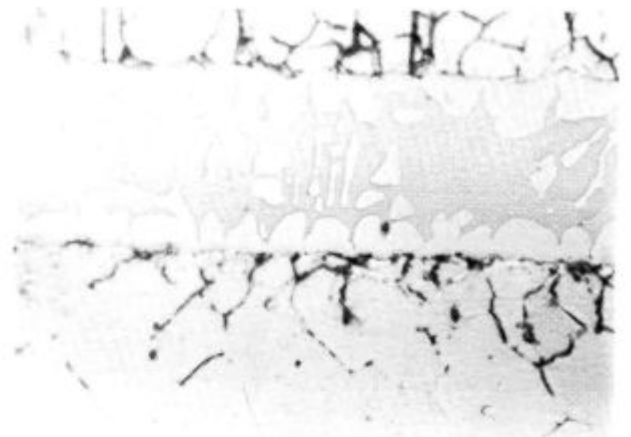
Spajkanje medu z L-CuP7 in nerjavnega jekla vrste 18-8 s srebrovo spajko kažejo, da je talilo Degussa h special boljše od talila Instituta za varilstvo.

Že med samim delom je bilo talilo Degussa h special bolj tekoče, kar je omogočilo že pri uporabi tehnike b kvalitetne spoje brez napak ali z malo njih. Podobne natezne trdnosti so bile pri talilu Instituta za varilstvo dobljene s predhodnim platiranjem spajkalnih površin s spajko. To dokazuje, da je to talilo dobro razkrojilo



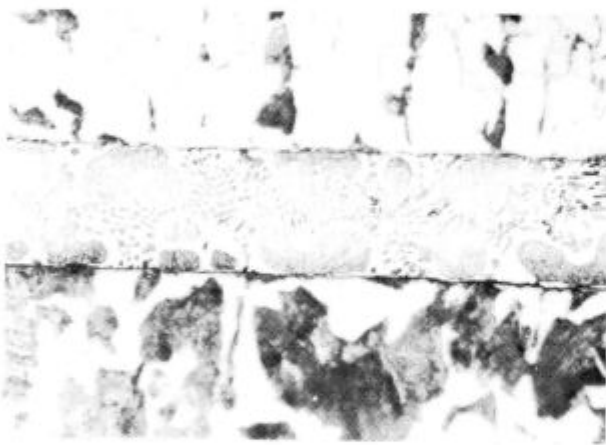
Pov. (Magn.): 100 x Pov. (Magn.): 100 x

osnova: Cu | CuZn39Pb2
 base metal: Cu | CuZn39Pb2
 spajka (brazing alloy): L-CuP7



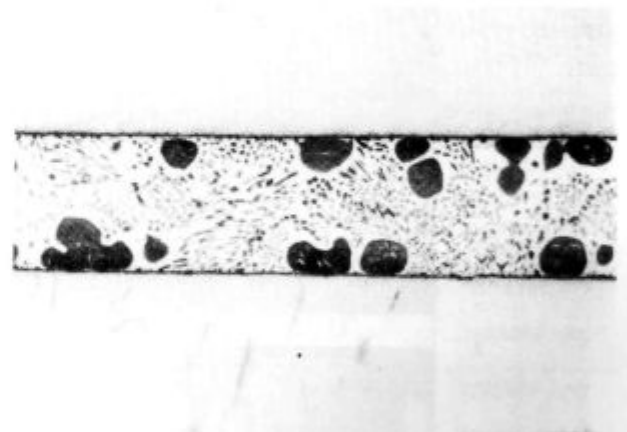
Pov. (Magn.): 400 x

osnova: Č. 4580
 base metal: X5CrNi18 9
 spajka (brazing alloy): L-Ni7



Pov. (Magn.): 400 x

osnova: jeklo z 0,16 % C in 0,34 % C
 base metal :structural steel (0,16 and 0,34 % C)
 spajka (brazing alloy): L-Ag40Cd



Pov. (Magn.): 400 x

osnova: Č. 4580
 base metal: X5CrNi18 9
 spajka (brazing alloy): L-Ag40Cd

Slika 3: Mikrostrukture spojev
 Figure 3: Microstructures of brazed joints

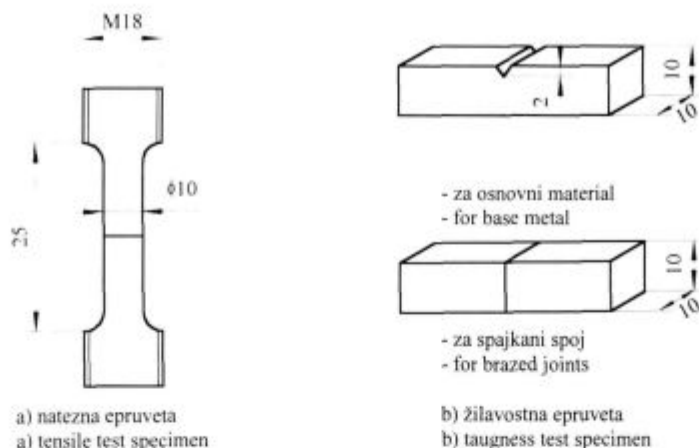
površinske kromove okside, vendar prepočasi za tehniko spajkanja b. Zaradi večje viskoznosti talila ga spajka pri hitrem zoženju reže po stalitvi (masa vzorca) ni mogla izriniti iz nje. Zato je ostalo več nezalatih mest. Če bi režo kontrolirali z distančniki, bi po vsej verjetnosti dobili podobne mehanske lastnosti. Očitno je, da potrebuje inštitutsko talilo širšo režo v primerjavi z Degussa h special.

Žilavosti spojev iz predhodno platiranih spajkancev so bile malo večje. Verjetno pa bi pri večjem številu vzorcev obeh vrst prišli do podobne povprečne vred-

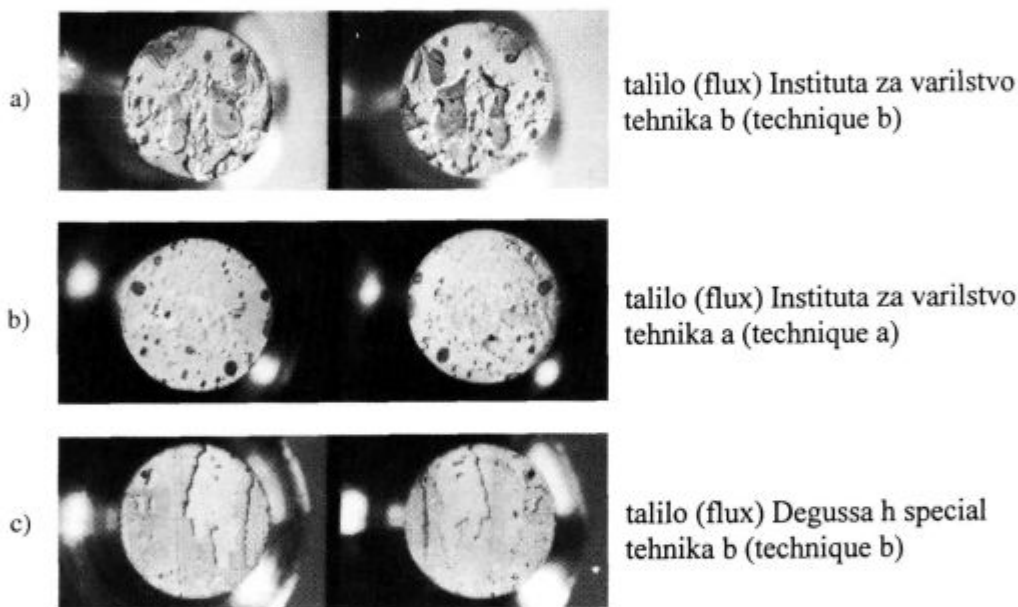
nosti. Najslabše mehanske lastnosti so imeli spoji z L-Ni7, ki je zelo krhka.

Pri ogljikovem jeklu so bile podobne trdnosti neodvisne od tehnike spajkanja. Inštitutsko talilo je bilo dovolj kvalitetno (agresivno), da je hitro reagiralo s površinskimi oksidi. Omogočilo je dobro oprijemljivost in tekočnost spajke tudi v ozki reži, ki se je pojavila po stalitvi spajke in pritisku zaradi lastne mase vzorca.

Na prelomih preizkušancev za natezni preizkus so tri značilne oblike. Slika 5 a) prikazuje spajkani spoj z večjim številom napak (nezalita mesta, poroznost).



Slika 4: Dimenzije in oblika epruвет
Figure 4: Dimensions and shape of test specimens



Slika 5: Prelomne površine spajkanih spojev s srebrovo spajko na nerjavnem jeklu
Figure 5: Fracture surfaces of brazed joints on stainless steel made with silver filler metal

Takšne površine so nastale pri spajkanju nerjavnega jekla in medu pri tehniki b) ob uporabi institutskega talila. To je razlog za slabše mehanske lastnosti spojev. Prelom poteka po sredini spajke.

Slika 5 b) nam kaže značilno prelomno površino spajkanega spoja s predhodno platiranima stičnima površinama s spajko. Vidna je poroznost. Take površine so nastale na ogljikovem in nerjavnem jeklu s srebrovo spajko pri tehniki spajkanja a, na nerjavnem jeklu z L-Ni7 in pri spajkanju bakra z L-CuP7. Drobna poroznost ima zelo majhen vpliv na mehanske lastnosti. Prelom poteka po sredini spajke.

Slika 5 c) prikazuje prelomno površino, ki je značilna za spajkanje medu z L-CuP7, ter nerjavnega in

ogljikovega jekla s srebrovo spajko in tehniko b) z ustreznim talilom. Spoj ima zelo malo vidnih napak, prelom pa se širi pretežno na mejni površini z osnovo (vidne so brusne raze). V tem primeru je popustila adhezijska vez. Kljub različnim prelomnim površinam (sliki 5 b in 5 c) so bile mehanske lastnosti spojev, kjer sta bili preizkušeni obe tehniki, zelo podobne.

4 Sklep

Rezultati preiskav so pokazali, da spajkalni ciklus vpliva na mehanske lastnosti preizkušanih osnovnih materialov, tako da se zmanjša natezna trdnost, povečata pa raztezek in žilavost.

Tabela 2: Mehanske lastnosti
Table 2: Mechanical properties

Material (Base metals)	Spajka in talilo (Filler metals, Flux)	Tehnika spajkanja (Brazing technique)	Natezna trdnost (Tensile strength) (N/mm ²)	Raztezek (Elongation) (%)	Žilavost (Impact strength) (J/cm ²)	Opombe (Remarks)
elektrolizni baker	/	/	294; 295; 295	24,5; 24,7; 27,4	102; 102; 103	dobavljeno stanje simulacija spajkanja spajkani spoj
	/	/	223; 230; 232	41; 41; 43	170; 172; 173	
CuZn39Pb2	L-CuP7 brez talila	plamensko b	223; 230; 232	41; 41; 43	3,8; 3,8; 3,6	dobavljeno stanje simulacija spajkanja spajkani spoj spajkani spoj
	/	/	447; 447; 449	21,6; 22; 22	9,45; 10,4; 10,8	
	/	/	419; 423; 425	28,4; 30,7; 31	26; 27; 30	
	L-CuP7 F-SH1*	plamensko b	150; 167; 197	/	1,1; 1,4; 1,7	
Č. 4580	L-CuP7 F-SH1**	plamensko b	208; 213; 223	/	2,2; 2,2; 2,4	dobavljeno stanje simulacija spajkanja spajkani spoj spajkani spoj
	/	/	650; 653; 662	40; 41; 42	259; 268; 273	
	/	/	635; 640; 643	46; 48; 50	292; 311; 326	
	L-Ag 40 Cd F-SH1*	plamensko b	133; 164; 214	/	1,3; 1,3; 1,4	
	L-Ag40 Cd F-SH1*	plamensko a (platirano)	354; 358; 386	/	4,3; 4,3; 6,1	
	L-Ag40 Cd F-SH1**	plamensko b	332; 378; 409	/	3,6; 3,7; 3,8	
Jeklo (0,16 % C)	/	/	646; 662; 662	20; 22; 22,4	215; 218; 219	dostavljeno stanje simulacija spajkanja
	/	/	573; 580; 586	26,5; 28; 30	259; 260; 268	
Jeklo (0,34 % C)	/	/	755; 764; 770	14; 15,8; 16,6	/	dostavljeno stanje simulacija spajkanja
	/	/	673; 675; 680	24,5; 26,5; 26,8	/	
Jeklo (0,16 %C/0,34%C)	L-Ag40Cd F-SH1*	plamensko b	462; 528; 534	/	/	spajkani spoj
	L-Ag40Cd F-SH1*	plamensko a (platirano)	404; 522; 526	/	/	spajkani spoj
Jeklo 0,1 % C	L-Ag40Cd F-SH1*	plamensko b	/	/	5,9; 6,1; 8,5;	spajkani spoj
	L-Ag40Cd F-SH1*	plamensko a (platirano)	/	/	6,6; 6,8; 8,1	spajkani spoj

* talilo, izdelek Instituta za varilstvo (flux, made by Institut za varilstvo)

** talilo Degussa h special (flux, Degussa h Special)

*** vzorci razpadli že med izdelavo na stružnici (failure of the brazed joints during machining)

Tehnika spajkanja ima lahko odločilno vlogo na kvaliteto in mehanske lastnosti spajkanih spojev, njena izbira pa je odvisna predvsem od talila, kar dokazuje spajkanje med in nerjavnega jekla z različnimi talili.

Žilavosti spajkanih spojev so zelo slabe, kljub temu da so srebrove spajke duktilne. Spoji imajo, ne glede na spajko, zelo slabo odpornost proti širjenju razpoke.

Spajkani spoji redko dosegajo trdnost osnovnega materiala: vzorci največkrat počijo po spoju (izjema je npr. baker, spajkan s spajko L-CuP7). Od preizkušenih spajk ima L-Ni7 slabe mehanske lastnosti kljub difuzijskemu spoju. Primerjava s srebrovimi spajkami (adhezijski spoj) pa kaže, da difuzijska povezava spajke z osnovo ni merilo za dobre mehanske lastnosti spajkanih spojev.

5 Literatura

- H. Manko: *Solders and Soldering*, Mc Graw-Hill New York, 1992
- N. Bredz: Investigation of factors determining the tensile strength of brazed joints. *Welding Journal*, 33, 1954, 11, 545s-563s
- J. Colbus et al.: Notes on the strength of brazed joints. *Welding Journal*, 41, 1962, 9, 413s-919s
- Brazing Manual. American Welding Society, 1963
- Y. Suezawa: Effects of roughness on the soldered joint strength. *Transactions of the Japan Welding Society*, 5, 1974, 2, 52-61
- Y. Suezawa: Investigation of roughness effects on the tensile strength of brazed joint. *Transactions of the Japan Welding Society*, 3, 1972, 2, 17-25
- Y. Suezawa: Relation between roughness and impact strength of brazed joint. *Transactions of the Japan Welding Society*, 7, 1976, 1, 9-17

- ⁸ G. Humpston, D. M. Jacobson; *Principles of soldering and brazing*, ASM International, 1993
- ⁹ J. D. Boughton, M. H. Sloboda; Embrittling effects of trace quantities of aluminium and phosphorus on joints brazed in steels. *Welding and Metal Fabrication*, 38, 1970, 8, 335-340
- ¹⁰ L. Steinhäuser, V. Knott; Lötten von Titanlegierungen in Triebwerksbau, DVS Verlag, Düsseldorf, *DVS-Berichte*, Band 125, 1989, 25-29
- ¹¹ D. S. Duvall et al; TLP bonding: a new method for joining heat resistant alloys. *Welding Journal*, 58, 1974, 4, 203-214
- ¹² E. E. Schillinger, H. J. Addison, jr.; Effect of fluxes on steel joints brazed with silver base filler metal; *Welding Journal*, 1976, 10, 302s-308s
- ¹³ *Welding Handbook*, section 3B: Welding, cutting and related processes, AWS, 1971
- ¹⁴ G. Sheward; *High temperature brazing in controlled atmospheres*, Pergamon Press, 1985, 18-19
- ¹⁵ P. Zaremba; *Hart- und Hochtemperaturlöten*, DVS Verlag, Düsseldorf, 1988, 63-65 in 79-81
- ¹⁶ Kawakatsu; Corrosion of B-Ag brazed joints in stainless steel. *Welding Journal*, 52, 1973, 6, 233s-239s