UDK 621.791.03:621.791.89

Konstrukcija varilne naprave in preizkus difuzijskega varjenja

VIKTOR PROSENC

1. Uvod

Difuzijsko varjenje je razmeroma mlad varilni postopek, ki se uvaja v proizvodnjo le v omejenem obsegu, ker je zaradi dolgih varilnih časov njegova produktivnost majhna. Vendar se v posebnih primerih le uvaja v prakso, o tem pišejo strokovne revije v SSSR, kjer so ga najprej razvili, pa tudi v zahodni Evropi in drugod [1], [2].

Prednost difuzijskega varjenja je v majhnem dovodu toplote, zelo majhni plastični deformaciji varjencev, omogoča pa zvarjenje tudi takšnih gradiv (kovin in nekovin), ki se jih z drugimi postopki ne da zvarjati.

Na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani je bila v okviru raziskovalne naloge zasnovana in izdelana varilna naprava, na kateri je bilo preizkušeno zvarjenje večjega števila kovin, zlitin in tudi nekovin v homogene in heterogene zvarne spoje, tj. medsebojne spoje istovrstnih in raznovrstnih materialov [3].

2. Osnove difuzijskega varjenja

Že iz imena izhaja, da je osnovni fizikalni proces, po katerem nastane zvarni spoj, difuzija, ki poteka v trdnem stanju pri zvišani temperaturi. Zvarjenje je najuspešnejše v vakuumu, mogoče pa je tudi varjenje v zaščitni atmosferi ali nevtralnih solnih kopelih. Varilni parametri so temperatura, tlak in čas ogrevanja varjencev, pri varjenju v vakuumu pa tlak — vakuum v varilni komori. Pomemben dejavnik je tudi kakovost stičnih ploskev, ki morajo biti čiste in ravne, vendar ni treba, da bi bile fino brušene ali celo spolirane. Zadosten stik med varjencema se doseže šele s pritiskom in plastično deformacijo. Pomemben parameter je tudi temperatura, ki hkrati vpliva na hitrost difuzije in velikost plastične deformacije pri izbranem tlaku in času zvarjanja. Zato je vedno neka odvisnost med mehanskim pritiskom, časom in temperaturo, kar je treba glede na vrsto in dimenzijo materiala ugotoviti s preizkusi.

Pri varjenju v vakuumu ima pomembno vlogo stopnja vakuuma, ki se uravnava po lastnostih materiala in temperaturi. Vakuum v varilni komori ne preprečuje samo oksidacije stičnih ploskev in s tem zmanjšuje potreben čas za aktivacijo difuzije skozi stično ploskev, ampak prihaja pri zvišani temperaturi zaradi termične efuzije do odsublimiranja oksida iz zvarne špranje. Možno je difuzijsko zvarjanje dveh varjencev iz istovrstnega materiala ali iz raznovrstnih materialov, pa tudi zvarjanje treh različnih materialov med seboj, to je zvarjanje z vmesnim vložkom, kar je podobno difuzijskemu lotanju.

Materiali so lahko kovine, zlitine ali tudi nekovine. Pri tem seveda ostajajo veljavni vsi zakoni difuzije. Hitrost, podana s količino prenesene mase snovi skozi določeno ploskev v nekem času je po prvem Fickovem zakonu:

$$dm = -D \frac{dc}{dx} S\, dt$$

Torej je odvisna od razlike koncentracije elementov v varjencih. Po tem zakonu bi zvarjenje istovrstnih materialov na videz ne bilo mogoče. Vendar izkušnje to možnost potrjujejo, ker v tem primeru ni odločilna razlika koncentracije elementov v notranjosti varjenca, ampak med varjencem in prazninami v zvarnem stiku. Le-te se zapolnijo po površinski difuziji, šele nato pa steče difuzija v globino:

Mehanizem difuzijskega varjenja bi lahko razdelili na naslednje faze:

— prva faza je lokalna plastična deformacija neravnin na površinah v zvarnem stiku, kjer se nato ob primernem vakuumu in temperaturi začne prvi prenos snovi;

— v drugi fazi poteka usmerjena difuzija po površini, ki zapolni vrzeli med varjencema;

— v zadnji fazi se usmeri difuzija v globino, in sicer ob napredujoči rekristalizaciji v zvarnem stiku, ki z rastjo novih kristalov premosti stično mesto. Rekristalizacijo pa spremlja tudi očiščenje stičnih ploskev, ko se oksidi in nečistoče delno raztopijo ali preidejo z difuzijo iz stika v osnovno kovinsko maso, oziroma se iztisnejo iz stika.

Po številnih podatkih [4] so varilni parametri naslednji:

a) tlak ($p = F/A$, F = sila stiskanja, A = prerez, pri čemer naj bo pri varilni temperaturi $p > \sigma_v$), je odvisen od vrste materiala, dimenzije in temperature;

b) temperatura je po navedbah različnih avtorjev [5], [6] (0,55 ... 0,88) ϑ_L (ϑ_L je tališče kovine). Pri različnih tališčih ali v intervalu taljenja pri zlitinah, je treba upoštevati nižjo vrednost;

c) vakuum naj bo med $1{,}33(10^{-1} \ldots 10^{-3})$ Pa. Vendar pri višjem vakuumu in varilni temperaturi nekatere kovine že preveč izhlapevajo (cink v zlitinah). V takšnih primerih je ugodnejše varjenje v zaščitnih plinih, tako da se najprej pri sobni temperaturi varilna komora izprazni do vakuuma 10^{-3} Pa, nato pa napolni z nevtralnim plinom in se varjenca pod tlakom ogrejeta na varilno temperaturo;

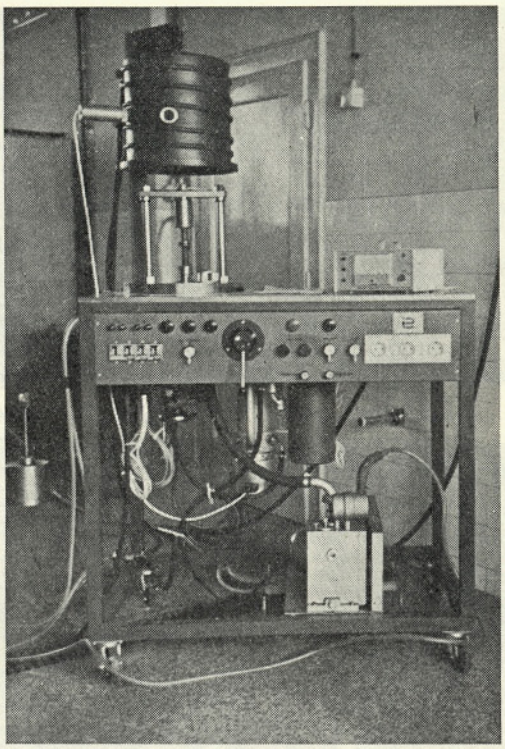
d) čas varjenja je odvisen od materiala in preostalih parametrov. Je razmeroma dolg, doseže velikostni red nekaj minut, vendar je najprej treba doseči potrebni vakuum in nato varjenca še ogreti na varilno temperaturo.

3. Naprava za difuzijsko varjenje

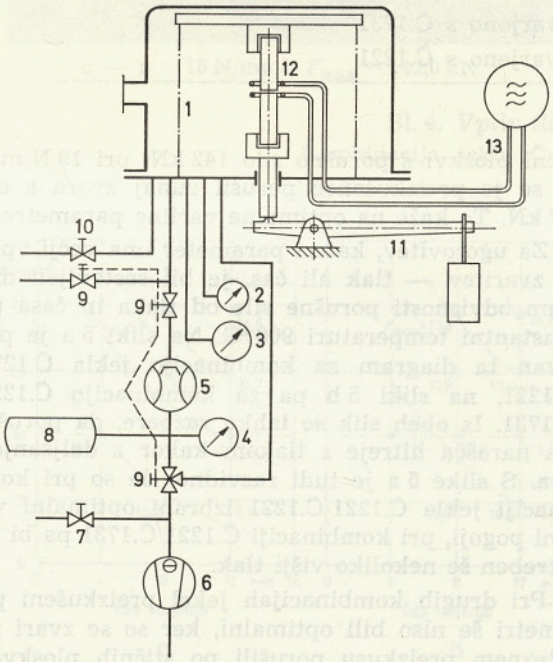
Pri zvarjanju v vakuumu je naprava sestavljena iz vakuumske varilne komore, naprave za vpenjanje varjencev in ustvarjanje potrebnega pritiska, naprave za ogrevanje varjencev in merilnih elementov za opazovanje in vodenje procesa.

Vpenjanje in stiskanje varjencev je lahko mehanično, hidravlično ali pnevmatično, lahko pa se izkoristi temperaturno raztezanje trdno vpetih varjencev. Ogrevanje se lahko izvaja na različne načine, najugodnejše pa je induktivno.

Shema takšne varilne naprave je prikazana na sliki 1. Pri konstruiranju varilne naprave so bile izkoriščene izkušnje izdelovalcev vakuumskih naprav.* Ogrevanje je izvedeno induktivno z visokofrekvenčnim generatorjem moči 10 kW in objemnim induktorjem. Pritisk se doseže mehanično z utežjo, vendar konstrukcija omogoča tudi priključitev standardnega hidravličnega valja. Pritisna sila na varjencih povzroča pri premeru do 20 mm tlačne napetosti do 25 N/mm². Merjenje temperature je optično ali s termoelementi kontaktno. Na sliki 2 je prikazana naprava.



Sl. 2. *Naprava za difuzijsko varjenje*



Sl. 1. *Shema varilne naprave za difuzijsko varjenje*

1 — varilna komora, 2 — merilna glava Pirani II, 3 — merilna glava Penning, 4 — merilna glava Pirani I, 5 — difuzijska črpalka, 6 — rotacijska črpalka, 7 — ventil za vpust atmosfere, 8 — predvakuumski recipient, 9 — programski ventil, 10 — dodajanje plina, 11 — ročica z utežjo, 12 — varjenec in ogrevalni induktor, 13 — VF-generator

* Naprava je bila izdelana s sodelovanjem Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko v Ljubljani.

4. Preizkus zvarjanja različnih kovin in zlitin

Naprava je bila izdelana in opremljena za zvarjanje valjastih varjencev s premerom do 20 mm. Za preizkusni material so bila izbrana jekla več različnih kakovosti, siva litina, nodularna litina, zlitine težkih kovin (Fe, Cr, Ni, Co, W in Mo), baker, med, aluminij in zlitine Al, karbidna trdina in silit. Preizkusi so bili opravljeni s kombinacijami istovrstnih in raznovrstnih materialov. V razpredelnici 1 so podani preizkušani materiali in njihova približna sestava, na sliki 3 pa so prikazane kombinacije materialov v zvarnih spojih.

Preizkusi z jeklom so bili izvedeni pri treh različnih temperaturah 800, 900 in 1000 °C, treh časih 4, 8 in 12 minut ter pri štirih tlakih 5, 10, 15

	Č.4571	Č.9683	Č.4150	Č.1941	Č.4732	Č.1731	Č.1221
Č.1221	●		●	●	●	●	+
Č.1731		●	●			o	
Č.4732		o	o		o		
Č.1941				o			
Č.4150			o				
Č.9683		o					
Č.4571							

Varilni parametri:
+ optimalni
● delno ustrezni
o še nedoločeni

Sl. 3. *Preizkusne kombinacije jekel*

Razpredelnica 1. *Preizkusni materiali (označba in sestava)*

Vrsta materiala	Označba trgovska	Označba po JUS	Približna sestava %
Jekla			
— za cementiranje	C 15	Č.1221	0,15 C
— za poboljšanje	C 60	Č.1731	0,60 C
— za poboljšanje	VCMo 140	Č.4732	1,00 C, 0,20 Mo
— orodno	OC 100	Č.1941	1,00 C
— orodno	OCR 12	Č.4150	2,00 C, 12,00 Cr
— orodno	BRU	Č.9683	1,25 C, 4,00 Cr, 10,00 W, 3,20 V, 10,50 Co
— avstenitno	Prokron	Č.4571	17,50 Cr, 12,30 Ni, 0,15 Nb
Siva litina		SL 15	zvarjeno s Č.1221
Nodularna litina		NL 42	zvarjeno s Č.1221 in Č.1941
Zlitine			
— akrit			21 . . . 23 Cr, 12,00 W, < 2,00 Fe preostalo Co, zvarjeno s Č.1221
— permil			19,50 Ni, 3,50 Mo, preostalo Fe, zvarjeno s Č.1731
— milvar			28,00 Ni, 18,00 Co, preostalo Fe, zvarjeno s Č.1221
Karbidna trdina	Widia P-20		zvarjeno s Č.1731
Silit	Si-karbid		zvarjeno s Č.1221

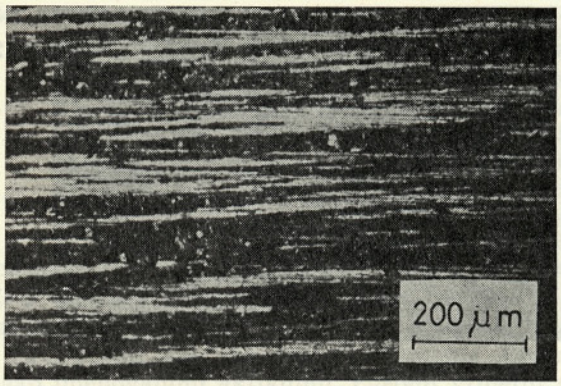
in 19 N/mm². Poleg tega je bil v uvodnih preizkusih ugotovljen tudi vpliv priprave površine na potek zvarjanja in kakovost zvarnega spoja.

Stične ploskve so bile postružene in brušene na različne stopnje hrapavosti (merjeno z merilnikom hrapavosti Talysurf 4). Za uspešno zvarjanje je najugodnejše brušenje čelnih ploskev do kakovostnega razreda 5 . . . 6. Nadalje je bilo ugotovljeno, da je za nelegirana in malo legirana jekla zadostna že temperatura ogrevanja 900 °C, le pri močno legiranih jeklih (orodnih) ta temperatura ni zadosti visoka. Tudi lega brusilnih raz na stičnih ploskvah varjencev ima vpliv na zvarjanje. Dobro je, če so raze na obeh varjencih vzporedne, da je delež stične ploskve v dejanskem stiku čim večji.

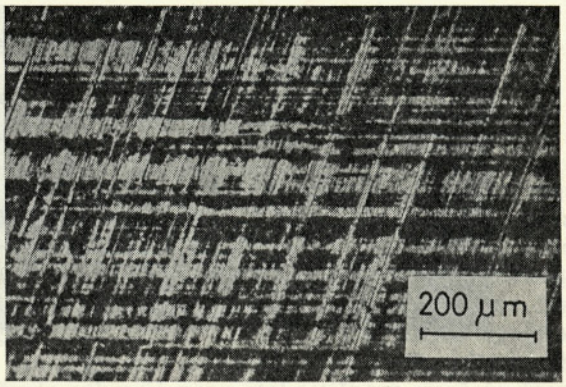
Ob upoštevanju teh ugotovitev je bila nato opravljena serija preizkusov za določitev vpliva časa in tlaka zvarjanja na stopnjo zvaritve. Preizkusi so bili izvedeni pri temperaturi 900 °C in kakovostnem razredu stične ploskve 5 . . . 6, s spreminjanjem tlaka (5, 10, 15 in 19 N/mm²) in časa (4, 8 in 12 minut). Na slikah 4 a, b, c in d je prikazan vpliv višanja tlaka na stopnjo zvaritve pri času 8 minut. Stopnja zvaritve je definirana s porušno silo F_{max} v kN. Pri tlaku 5 in 10 N/mm² se je zvarni spoj porušil popolnoma po stični ploskvi ob nateznih obremenitvah 101,6 in 96 kN. Pri tlaku 15 N/mm² je porušitev samo delno še potekla po stični ploskvi s porušno silo 142 kN, pri 19 N/mm² pa se je preizkušanec porušil zunaj zvara s silo 147 kN. To kaže na optimalne varilne parametre.

Za ugotovitev, kateri parameter ima večji vpliv na zvaritev — tlak ali čas, je bil sestavljen diagram odvisnosti porušne sile od tlaka in časa pri konstantni temperaturi 900 °C. Na sliki 5 a je prikazan ta diagram za kombinacijo jekla Č.1221/ /Č.1221, na sliki 5 b pa za kombinacijo Č.1221/ /Č.1731. Iz obeh slik se lahko razbere, da porušna sila narašča hitreje s tlakom kakor z daljšanjem časa. S slike 5 a je tudi razvidno, da so pri kombinaciji jekla Č.1221/Č.1221 izbrani optimalni varilni pogoji, pri kombinaciji Č.1221/Č.1731 pa bi bil potreben še nekoliko višji tlak.

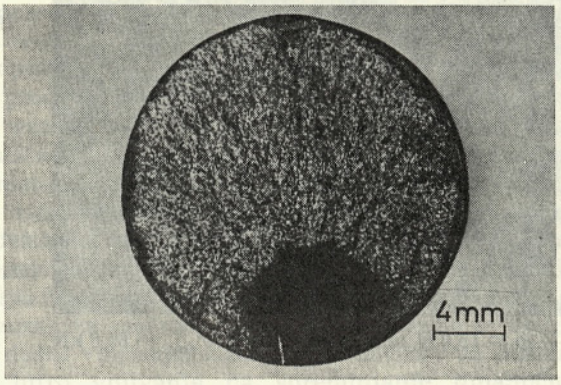
Pri drugih kombinacijah jekel preizkušeni parametri še niso bili optimalni, ker so se zvari pri nateznem preizkusu porušili po stičnih ploskvah. Pri močno legiranem orodnem jeklu je pomembna tudi toplotna obdelava varjenca oziroma hitrost ohlajanja po varjenju. Ogrevanje in ohlajanje lahko vplivata na strukturo v zvaru in toplotno prizadetem področju, velikost karbidov (slika 6 a) in njihovo porazdelitev. Na globino difuzije vplivajo vsi varilni parametri. Na sliki 6 b je vidna globina difuzije v jeklu Č.1221 pri zvaritvi kombinacije Č.1221/Č.4150. Pri časih 8 ali 12 minut je difuzija opazna do globine 50 do 150 μm.



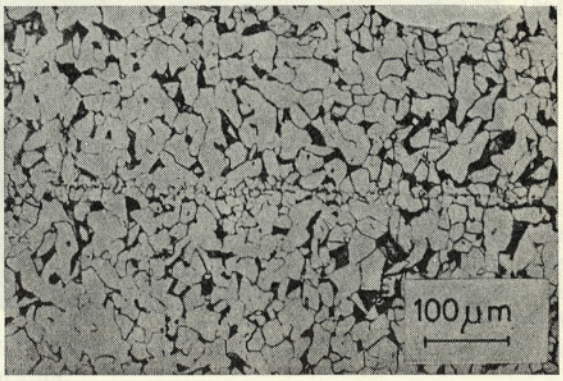
a — p = 5 N/mm², F_{max} = 101,6 kN



b — p = 10 N/mm², F_{max} = 96,0 kN

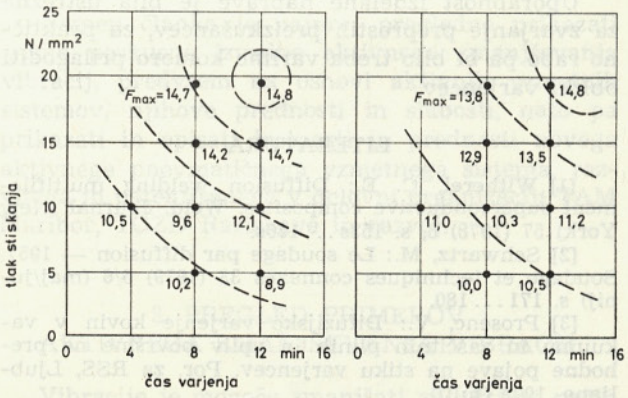


c — p = 15 N/mm², F_{max} = 142,0 kN



d — p = 19 N/mm², F_{max} = 147,0 kN

Sl. 4. *Vpliv tlaka na stopnjo zvaritve*
Kombinacija jekla Č.1221/Č.1221, temperatura 900 °C, čas 8 min

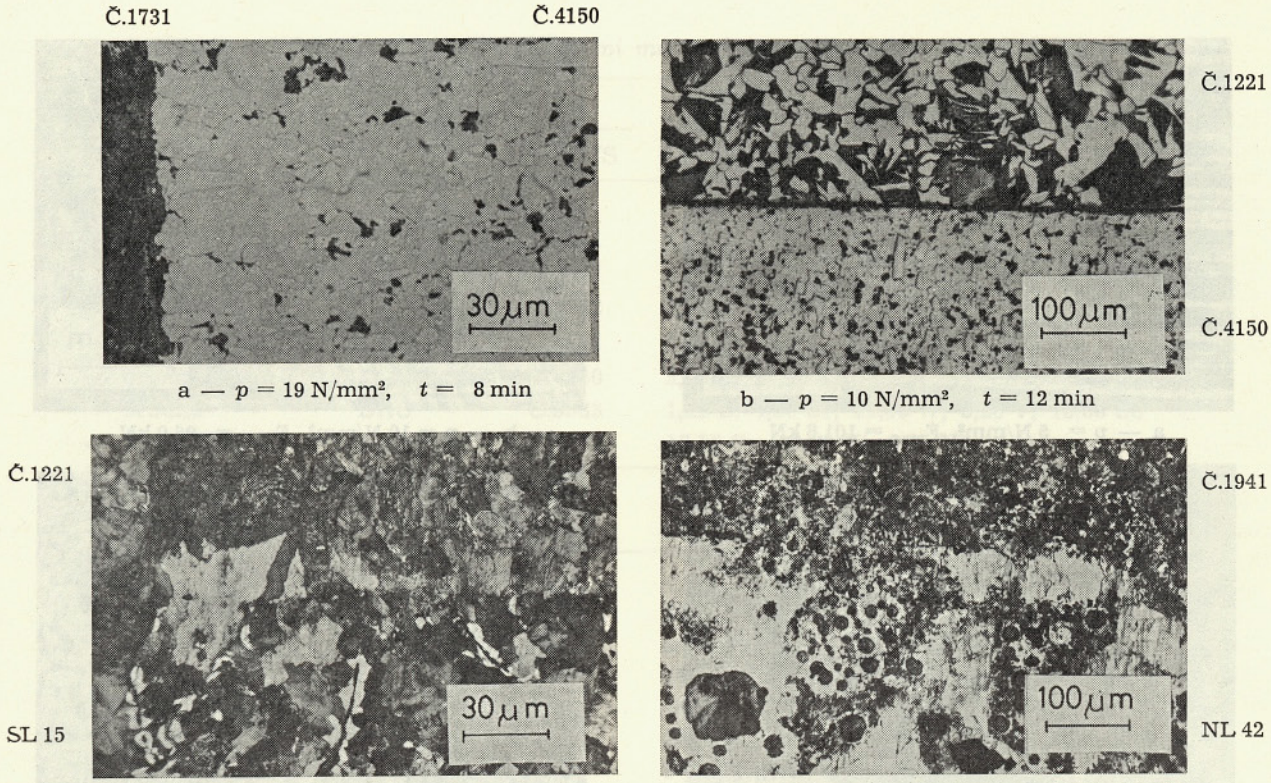


Sl. 5. *Odvisnost porušne sile F_{max} od časa zvarjanja in tlaka na varjenca*
a — kombinacija jekla Č.1221/Č.1221
b — kombinacija jekel Č.1221/Č.1731

Uspešno je bilo tudi zvarjanje sive in nodularne litine z jeklom. Difuzija je pri teh kombinacijah materialov bistveno aktivnejša pri istih varilnih parametrih. Na sliki 6 c je struktura zvara Č.1221 in SL 15. Globina difuzije na strani jekla dosega tudi 250 µm, ne da bi bilo opazno na strani sive litine razogljičenje. Zelo intenzivna difuzija je opazna tudi pri kombinaciji materialov Č.1941 in NL 42 (slika 6 d). V nodularni litini pride zaradi ogretja do razpada grobega globularnega grafita v mnogo finejše delce. Pri obeh zvarjenih kombinacijah je prišlo do porušitve pri nateznem preizkusu po litini in ne po zvaru.

Nobenih težav ni bilo pri zvarjanju jekla in zlitin akrit, permil in milvar. Pri metalografski preiskavi niso bile opazne difuzijske cone, kar pa se lahko pripiše tudi zahtevnejši metalografski tehniki (heterogeni spoji). Pri nateznem preizkusu je prišlo pri vseh kombinacijah do porušitve po jeklih Č.1221 in Č.1731. Zvarjanje lahkih kovin in zlitin ter bakra je zahtevnejše. Pri aluminijskih zlitinah je bilo zvarjanje nelegiranega aluminija uspešno, pri zlitinah pa prihaja pogosto do izparevanja legirnih elementov. Enako se dogaja pri zvarjanju medi s cinkom, za zvarjanje bakra pa je bila moč visokofrekvenčnega generatorja premajhna.

Poleg kovin je bilo uspešno tudi zvarjanje karbidne trdine in silita (silicijevega karbida) z jeklom. Po postopku difuzijskega varjenja je bil izdelan stružni nož z držalom iz jekla Č.1731 in



a — $p = 19\ N/mm^2$, $t = 8$ min

b — $p = 10\ N/mm^2$, $t = 12$ min

c — $p = 13\ N/mm^2$, $t = 8$ min, $F_{max} = 40{,}9$ kN

d — $p = 15{,}6\ N/mm^2$, $t = 13$ min, $F_{max} = 85{,}6$ kN

Sl. 6. *Struktura zvarov nekaterih zvarjenih kombinacij materialov*

karbidne trdine Widia P-20 (ploščica dimenzije 11 × 11 × 2,5 mm). Varilni parametri so bili: tlak zvarjanja 35 N/mm^2, temperatura 900 do 950 °C, čas 15 minut in vakuum $1{,}33 \cdot 10^{-2}$. Ploščica je bila privarjena tako, da je pri praktičnem preizkusu s struženjem materiala Č.4321 (z rezalno hitrostjo 49 m/min pri debelini odrezka 2,5 mm) vse sile prenašal strižno obremenjeni zvar. Pri tem ni prišlo do nikakršne porušitve.

Tudi zvaritev silita (palice iz silicijevega karbida) in jekla Č.1221 je bila uspešna. Razmere pri varjenju so bile: tlak 8,0 N/mm^2, čas 25 minut in temperatura 1000 °C. Ker je silit krhek material, je bila uspešnost zvaritve ocenjena po stični upornosti (prevodnosti) med silitom in jeklom v nezvarjenem in zvarjenem stanju. Upornost stika se je z zvaritvijo zmanjšala za 70 do 80 %.

5. Sklep

Konstrukcija preizkuševalne naprave za difuzijsko varjenje je bila za uvodne preizkuse primerna. Na njej je bilo izvedenih več serij uspešnih zvaritev jekel in jekel z zlitinami težkih kovin in nekovinskih materialov. Za zvarjenje dobro prevodnih kovin (Cu in Al) je bil razpoložljivi visokofrekvenčni generator premalo močan. Nadalje bi bilo za zlitine kovin z nizkim parnim tlakom primernejše varjenje v zaščitnem plinu kakor pa v vakuumu.

Uporabnost izdelane naprave je bila ustrezna za zvarjanje preprostih preizkušancev, za praktično rabo pa bi bilo treba varilno komoro prilagoditi obliki varjencev.

LITERATURA

[1] Witherel, C. E.: Diffusion welding multifilament superconductive composites. Weld. Journal (New York) 57 (1978) 6, s. 153s ... 160s.

[2] Schwartz, M.: Le soudage par diffusion — 1957. Soudage et techniques connexes 33 (1979) 5/6 (maj/junij) s. 171 ... 180.

[3] Prosenc, V.: Difuzijsko varjenje kovin v vakuumu in zaščitnih plinih in vpliv površine na prehodne pojave na stiku varjencev. Por. za RSS, Ljubljana, 1976 (julij).

[4] Kozakov, N. F.: Difuzionaja svarka v vakumie metalov, splavov i nemetalov, Mašinostroenie, Moskva, 1968.

[5] Larikov, L. N., V. F. Ribor in V. M. Feljčenko: Difuzionije procesi v tverdoi faze pri svarke, Mašinostroenie, Moskva, 1975.

[6] Mehlhorn, H.: Diffusionsschweissen in Theorie und Praxis, Schweisstechnik (Berlin), 23 (1973) 10 in 11, s. 462 ... 465 in 505 ... 506.

Avtorjev naslov: prof. dr. ing. Viktor Prosenc,
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani