

## TRDO SPAJKANJE V VAKUUMU IN V INERTNIH ATMOSFERAH

Andrej Pregelj, Robert Rozman, France Breclj

Iskra Zaščite, d. o. o., Stegne 35, 1000 Ljubljana

STROKOVNI ČLANEK

### POVZETEK

Trdo spajkanje v vakuumu in v inertnih atmosferah je spajanje kovinskih delov z dodajno kovino v okolju brez kisika. Poteka pri temperaturah višjih od 600 °C in pri tlakih nižjih od  $10^{-3}$  mbar; talila pri tem niso potrebna. Temperatura spajkanja je vedno nižja od tališč kovinskih sestavnih delov, ki jih želimo spojiti, in dovolj visoka, da dodajni material steče, omoči površino in se nanjo veže. Temperatura ne sme biti previsoka, da ne bi prišlo do izparevanja legirnih elementov v dodanem materialu ali do neželenih sprememb osnovne kovine. Med toplotno obdelavo potekajo difuzijski procesi med tekočo spajko in trdno fazo. Sledi ohlajanje, ko se dodajni material strdi. V vezni plasti navadno nastanejo intermetalne in eutektične faze. Vezna plast spajke mora biti čim tanjša, čim bolj homogena in brez poroznih mest ali razpok. Za vsako kombinacijo dodajne in osnovne kovine posebej izberemo velikost špranje, primeren čas pregrevanja, temperaturo spajkanja in difuzijsko toplotno obdelavo.

**Ključne besede:** vakuumsko spajkanje, materiali, tesnost, hermetični spoji, spajanje kovin in metalizirane keramike

### Hard brazing in vacuum and in inert atmospheres

#### ABSTRACT

Brazing in vacuum and in inert atmospheres is the process of joining metal or metallized parts with a brazing metal in absence of oxygen. Therefore melting additives are not needed. Hard brazing is performed at temperatures above 600 °C and at pressures below  $10^{-3}$  mbar. Brazing temperature is always lower than the melting point of metal component parts which have to be joined, and high enough that the filler material spills around and enables a good connection between the surfaces. At the same time it is not advisable if the temperature is too high as evaporation of alloy elements from the brazing material can occur or undesirable changes of metals to be joined may appear. During the heat treating, diffusion processes occur between the liquid braze material and the solidus phase. In the cooling period the braze material becomes hard. Usually intermetallic and eutectic phases are involved. The joining layers must be as thin and as homogeneous as possible and without porosity or cracks. For each combination of filler metal and basic component metal the gap size, suitable heating time, brazing temperature and diffusion heat treating has to be chosen.

**Keywords:** vacuum brazing, materials, tightness, hermetical joints, joining between metals and metalized ceramics

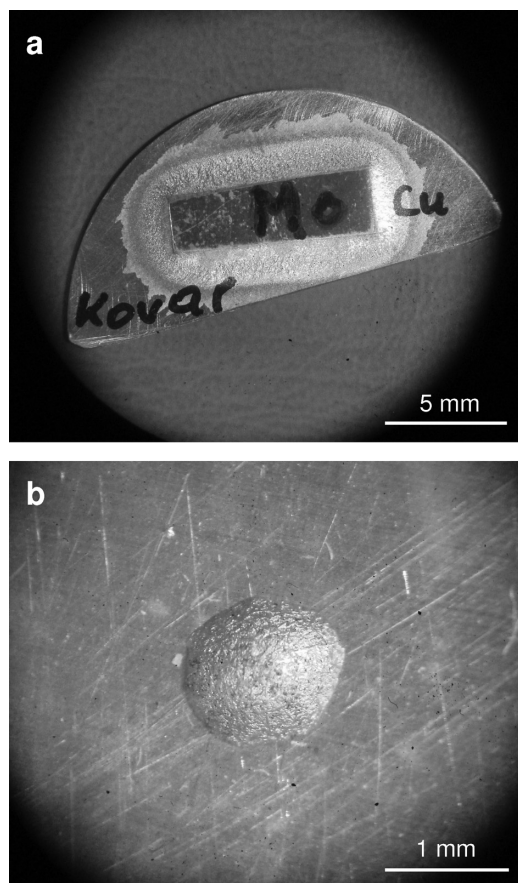
### 1 O SPAJKANJU

Spajkanje je spajanje kovinskih sestavnih delov s tretjo kovino – spajko, ki raztaljena zalije in spoji soležna obdelovanca. Postopek je uporaben za vse kovine in zlitine, pa tudi za sintrane izdelke in za dele iz metalizirane keramike. Morebitne kovinske prevleke površin (npr. galvanske) se pri tem ohranijo. Spajka je kovina ali zlitina z drugačno kemijsko sestavo in z nižjim tališčem kot osnovni material. Glavna pogoja za nastanek dobrega spoja, ki odgovarja zahtevam po trdnosti in tesnosti, sta dobra *omočljivost* med spajko

in soležnim materialom ter *čistost* stičnih površin. Glede na delovno temperaturo ločujemo spajke na mehke (tališča nekako do 400 °C) in na trde (tališče nad 600 °C). Med trdimi so za posebne zahteve še posebej primerne t. i. »visokotemperaturne« spajke s tališčem več kot 900 °C.

Postopki za spajkanja v vakuumu in v inertni atmosferi se izvajajo v zaprtih komornih pečeh, ki jih je mogoče izčrpati (vakuumske peči). Če gre za izdelke vrhunske tesnosti (npr. celice, ki morajo ostati hermetično zaprte več let), morajo biti te peči visokovakuumske, kjer dosegamo tlake nižje od  $10^{-5}$  mbar. Če pa je pomemben predvsem videz (npr. da površine niso oksidirane), je dovolj, da črpalni sistem izčrpamo vsaj malo pod  $1 \cdot 10^{-3}$  mbar. To so grobe ocene, v praksi nastajo odmiki navzgor in navzdol – vse je odvisno od okoliščin in zahtev, ki jih mora izpolnjevati končni izdelek.

Materiali za trdo spajkanje so lahko kovine, zlitine ali paste. Pri odločanju za vrsto spajke je najpomembnejša njena **omočljivost** (slika 1); čim boljša je, tem



Slika 1: Primer dobre (a) in slabše (b) omočljivosti

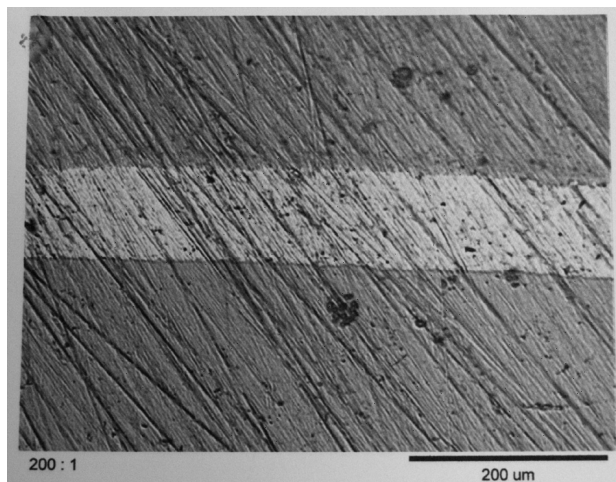
višji sta trdnost in tesnost spoja. Omočljivost je odvisna od kombinacije materialov, ki nastopajo v spoju. Drugo merilo pri izbiri spajke je temperatura tališča: čim nižja je delovna temperatura, tem manjša je poraba energije. Sestavni deli in tudi spajka morajo biti predhodno dobro očiščeni. Zato je potrebno, da je postopek čiščenja dobro izbran, da je urejeno primerno shranjevanje sestavnih delov, da je peč oz. segrevalna komora čista in da je črpalni sistem funkcionalen.

Prednosti spajkanja v vakuumu ali v inertni atmosferi so naslednje:

- talilo ni potrebno;
- čiščenje spajkanih delov v vakuumu ni potrebno, ker ni oksidiranih površin;
- zmanjšanje količine dragih orodnih jekel;
- ekološka neoporečnost;
- v vakuumu se materiali dodatno razplinijo, kar je pomembno za dolgotrajno delovanja zaprtih celic;
- vakuum je čisto okolje, ki zagotavlja, da se izognemo neželenim kemijskim reakcijam s plini iz atmosfere ali iz obdelovanca.

Med toplotno obdelavo potekajo v spoju difuzijski procesi med tekočo spajko in trdno fazo. V vezni plasti navadno nastanejo intermetalne in eutektične strukture. Za vezno plast spajke se priporoča debelina pod 0,10 mm. V praksi je to odvisno od izdelane špranje ter od ravnosti in gladkosti oprijemnih površin. Vedno je cilj, da dosežemo dobro homogenost brez nezalatih ali poroznih mest ter da je po ohlavitvi spoj brez razpok (**slika 2**).

Kaj se dogaja ob stalitvi spajke na zraku? Kovine na svojih površinah absorbirajo molekule zračne atmosfere. Kisik iz zraka reagira z ogreto kovino in tvori oksidno plast na površini. Med spajkanjem te plasti preprečujejo dober stik med samo kovino in spajko. Za preprečevanje nastanka oksidne plasti se



**Slika 2:** Lepo zalita špranja

uporabljajo talila ali pa se spajka v zaščitnem plinu ali v vakuumu.

Pri segrevanju v vakuumu ali v inertni atmosferi ne pride do oksidacije in privlačne sile na površini niso zasičene. Tekoča dodajna kovina (spajka) omoči čisto površino kovine in ob delovanju adhezijskih sil med obema gradnikoma spoja začne potekati difuzija med osnovno in dodano kovino. Med ohlajanjem se spajka strdi in kohezivna odpornost spoja naraste.

**Trdnost spoja** je odvisna od kohezivne in adhezivne odpornosti, kar izmerimo z nateznim preizkusom celotnega vzorca. **Tesnost spojev** preverimo oz. izmerimo s helijevim detektorjem netesnosti (angl. *helium leak detector*).

V praksi nastopa veliko okoliščin, ki jih je treba upoštevati za vsak primer posebej; pri tem so pomembne tehnične izkušnje razvojnega osebja. Nekatere bodo podrobneje predstavljene v naslednjih odstavkih.

## 2 MATERIALI ZA TRDO SPAJKANJE V VAKUUMU IN V INERTNI ATMOSFERI

Materiali za trdo spajkanje so na splošno lahko kovine, zlitine ali paste. Če spajke vsebujejo kovine z visokim parnim tlakom (cink, kadmij) ali druge lahko hlapljive sestavine (npr. vezivo v pastah), niso primerne oz. so prepovedane za uporabo v visokovakuumskih pečeh, ker s kondenzacijo umažejo njihove notranje stene, kvarno vplivajo na črpalni sistem in slabšajo čistost izdelkov.

Spajke lahko ločimo na več načinov:

- po višini tališča,
- po vsebnosti žlahtnih kovin,
- po medsebojni topnosti sestavin v zlitinah,
- po boljši ali slabši omočljivosti posameznih kovin itd.

Zanimiva je še opredelitev, ki jo najdemo v katalogih proizvajalcev: spajke z enakimi sestavinami so enkrat predstavljene kot vakuumske, drugič pa kot navadne (nevakuumske – ki so tudi običutno cenejše). Razlaga je naslednja: spajke imenujemo vakuumske, če so bile že v fazi metalurške izdelave pretaljevane v visokem vakuumu, pri čemer se je njihova kovinska struktura dobro razplinila (angl. *degassing*). To je pri nekaterih tehnologijah zelo pomembno. Pri izdelavi celic za elektronske namene prav dobro izplinjene visokovakuumske spajke bistveno pripomorejo, da se v njih vakuum oz. čista inertna atmosfera ne pokvarita.

Taki izdelki so npr. rentgenske in TV-elektronke, magnetroni, vakuumska stikala, plinski odvodniki, deli pospeševalnikov, vakuumski kondenzatorji in podobno.

Pri omenjenih elementih se zahteva, da se tudi drugi sestavni deli predhodno razplinijo ali pa morajo biti izdelani iz materialov s posebno visoko čistoto. Tako npr. proizvajalci bakra za elektronsko industrijo že v metalurškem postopku izdelajo posebno kvaliteto (»electronic grade«), ki ima izredno majhno vsebnost kisika.

Navadne, tj. nevakuumske trde spajke uporabljamo za izdelavo delov, ki so predvsem lepega videza, kot npr. deli instrumentov in aparatur, pripomočki v medicini in okrasni predmeti. K navadnim spajkam prištevamo tudi tiste v obliki past.

**Tabela 1** daje krajši pregled glavnih materialov za gradnjo in spajkanje elektronk, tj. za uporabo v visokovakuumskih tehnikah.

### 3 VAKUUM IN OKOLIŠKA ATMOSFERA PRI SPAJKANJU

Izraz »vakuumsko spajkanje« izhaja iz potrebe, da postopek izvedemo v vakuumskih pečeh. Dejansko pa pri tem velikokrat kombiniramo vakuum z različnimi plini. Večkrat se celo zahteva, da spajkamo v čistem plinu, vendar moramo tudi pri tem predhodno popolnoma izčrpati zrak iz segrevalne komore. Zato nujno potrebujemo peč z vakuumskim črpalnim sistemom. Pri vakuumskih postopkih ne dodajamo plinov in se zadovoljimo z doseženim tlakom residualne atmosfere, pri kombiniranih postopkih pa glede na tehnologijo dodamo določen plin.

Okoliška atmosfera pri spajkanju v vakuumskih pečeh (tj. v njihovih delovnih posodah ali retortah) je torej lahko:

**Tabela 1:** Lastnosti različnih materialov in spajk za vakuumске tehnologije

	Sestava w/%	Tališče $T_f/^\circ\text{C}$	Delovna temp. $T_d/^\circ\text{C}$	Tlak pare		Opombe
				pri temp. $T/^\circ\text{C}$	$p/\text{mbar}$	
<b>kovine</b>						
Pt	100	1770				
Pd	100	1550		820	$1 \cdot 10^{-8}$	za Mo, W
Fe	100	1535		900	$1 \cdot 10^{-8}$	
Ni	100	1452		900	$1 \cdot 10^{-8}$	
Au	100	1063		800	$1 \cdot 10^{-8}$	
Cu	100	1083		750	$1 \cdot 10^{-8}$	
				1000	$2 \cdot 10^{-5}$	
Ag	100	960		600	$1 \cdot 10^{-8}$	
				800	$4 \cdot 10^{-4}$	
In	100	156		500	$1 \cdot 10^{-8}$	elektronke
				800	$3 \cdot 10^{-4}$	
<b>metalizirana keramika</b>						
$\text{Al}_2\text{O}_3$	96	1453 (Ni-plast)				uporaba: npr. za telesa elektronk
<b>zlitine</b>						
FeNiCo	pribl. 52/29/19	pribl. 1450				(kovar)
FeNi	pribl. 50/50	1470–1525				(vakovit)
<b>spajke</b>						
AuPd	87/13	1260–1305				za Mo
CuNi	70/30	pribl. 1230				za W in Mo
CuAg	95/5	1000–1060				
CuAu	65/35	1000–1020				
CuAu	70/30	1015–1035				
AuNi	73,8/26,2	980–1010				za Mo
CuAu	60/40	980–1005				
AuNi	65/35	965–1075				
AuPd	95/5	970–1010	915			SCP5
AgAu	65/35	980–1000				
CuAu	57/43	980–1000				
AuCu	94/6	965–990				
AgCuPd	54/21/25	901–950	955			SCP4
AuNi	82/18	950				evtektik za Mo
AgCuPd	65/20/15	850–900	905			SCP3
AgIn	90/10	850–887	850			
AgCuPd	58,5/31,5/10	824–852	860			SCP2
AgCuPd	68,4/26,6/5	807–810	815			SCP1
AgCu	72/28	780	780			evtektik za elektronke
AgCuIn	64/26/10	698–723	710			elektronke



**Vakuumska:** ustvarimo jo v segrevalni komori z visokovakuumskim črpalnim sistemom. Pri doseženih tlakih (pod  $10^{-5}$  mbar) so v peči še vedno preostali plini, to je residualna atmosfera, ki jo sestavljajo: vodna para, vodik, dušik in kisik – vendar je njihova količina tako majhna, da ne pride do oksidacije površin segrevalnih kovinskih delov.

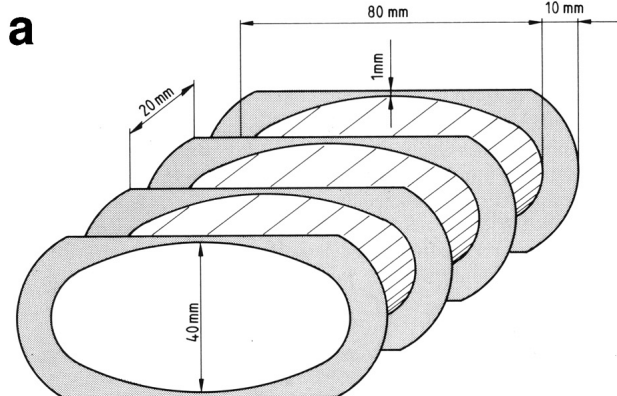
**Inertna:** tlaki so 300–1000 mbar. Navadno sta to plina argon in dušik, s katerima napolnimo delovni prostor v vakuumski peči, potem ko smo jo izčrpali vsaj do grobega vakuuma ( $< 0,1$  mbar). Inertni plin s svojo prisotnostjo preprečuje, da bi morebitne residualne molekule vode ali kisika povzročale oksidacijo. V

posebnih zahtevnejših primerih je potrebno predčrpanje do visokega vakuuma ( $10^{-5}$  mbar) in potem vpuščanje čistega inertnega plina. Pri plinskih odvodnikih so to argon, neon in vodik čistote 99,995 % ali boljše.

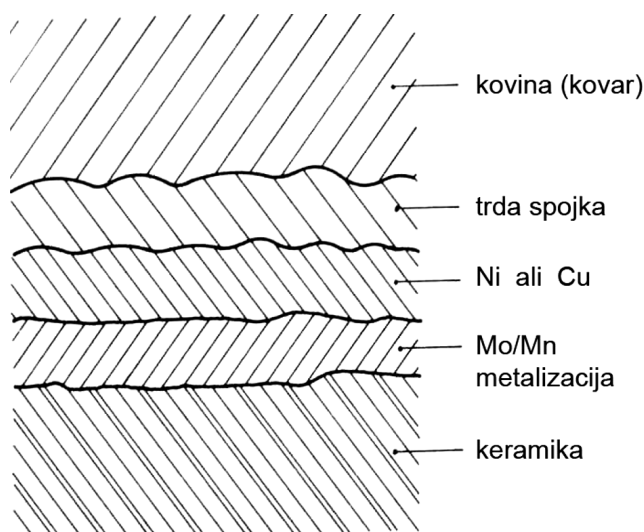
**Kvaziinertna:** Pogosto se uporabi mešanica enega od inertnih plinov z dodatkom 10–15 % vodika. V takih primerih ne moremo govoriti o inertni atmosferi, kajti vodik je reaktiven plin in ga dodajamo za rahlo čiščenje oksidov s površine tik pred spajkanjem. Zelo redko se uporabi samo vodikova atmosfera. Le-ta je lahko tudi kombinirana z vodno paro; takrat govorimo o vlažnem vodiku, s katerim istočasno dosežemo nežno aktivacijo površin.

Odločitev o izbiri atmosfere je odvisna od več dejavnikov. Tu navajamo nekaj izkušenj:

- Pri zahtevnih (sliki 3 in 4) elementih, kjer je potrebno segrevanje v visokem vakuumu, se lahko na koncu spajkanja vpusti malo vodika (ali le kratek prepih), kar deluje čistilno in hladilno. Uporablja se lahko tudi dušik, kadar ni nevarnosti tvorbe nitridov.
- Pri inkapsulaciji plinov v hermetično zaprte celice je treba nameniti pozornost zahtevam po čistoči plinov in njihovim oznakam.
- Kot inertno atmosfero se največkrat uporablja žlahtni plin argon; dušik je primeren le za manj zahtevne izdelke.
- Uporablja se tudi mešanica dušika in 10–15 % vodika.
- S spajkanjem v vodiku materiale istočasno dodatno očistimo in dobimo zelo lepe izdelke. Pri tem je treba biti poučen o nevarnost dela z vodikom in o mogočih posledicah pri spajkanju komponent iz navadnega bakra. Pri večini vrst komercialnega bakra med metalurško obdelavo



**Slika 3:** Primera visokovakuumske spajkanih delov: a) segment cevi pospeševalnika delcev, izdelan iz jeklene pločvine  $d = 0,3$  mm, trdo spajkan v vakuumu, b) vakuumsko tesna električna prevodnica, pri kateri je kovina tesno pri-spajkana na keramiko



**Slika 4:** Prezerna spoja keramika-kovina



**Slika 5:** Primer materiala, ki za spajkanje v vakuumu ni primeren. V kosu bakra, ki je vseboval nekaj kisika (nad pribl. 0,04 %), je v vodikovi atmosferi vodik reagiral s kisikom. Nastala je vodna para, ki je med kristali ekspandirala; struktura v notranjosti je razpokala in navzven povzročila bulo (premer bule je 6 mm).

kisik ni popolnoma odstranjen. Pri segrevanju takih materialov v vodikovi atmosferi pri višjih temperaturah nastanejo v notranjosti razpoke, na površini pa vidne izbokline. Porušenost strukture je lahko tolikšna, da element ni več vakuumsko tesen. Primer slabega materiala je predstavljen na **sliki 5**.

Začetni del segrevanja v vakuumu je namenjen razplinjanju. Material, ki ga iz zračne atmosfere postavimo v vakuum, oddaja pline, in če ga segrevamo, tudi pare. Viri teh emisij so torej:

- desorpcija na površini adsorbiranih snovi;
- difuzija plinov, raztopljenih v notranjosti;
- uparjanje kovinskih nečistoč iz kovinske strukture sestavnih delov vzorca.

#### 4 PRIMERI UPORABE SPAJKANJA

**Hermetično zaprte celice – splošno.** V njih so vakuum ali zelo čisti plini. Gre za številne posebne elemente v elektrotehniki. Notranjost takih celic je navadno namenjena prostemu gibanju elektronov, kadar je notranjost evakuirana, ali pa vžiganju in gorenju plazme v plinskih polnitvah. Obe dogajanji zahtevata najvišjo stopnjo tesnosti ohišja. Za namene delovanja tovrstnih elementov so v celico skozi izolativne materiale napeljane električne prevodnice; zato med sestavnimi deli poleg kovin najdemo vedno tudi keramiko. Tehnologija spajanja med kovinami in metalizirano keramiko (**slika 4**) je pri hermetičnih celicah vedno trdo spajkanje.

**Vakuumske celice.** Celice posebnih elektronk (npr.: elektronke, magnetroni, TV- in rentgenske elektronke) morajo za svoje delovanje vseskozi vsebovati visoki vakuum. Njihova izdelava poteka v vakuumskih pečeh v več fazah. Najprej se izdelajo

električne prevodnice z vtaljevanjem stekla ali s spajkanem v metalizirano keramiko. Nato se prevodnice privarijo ali prispajkajo (spajka z višjim tališčem) v glavni del ohišja. Končno izčrpavanje celice se izvaja po posebnem postopku preko bakrene cevke, čemur sledi odščipnjenje cevke, tj. hermetično zapiranje z mrzlim zvarom.

**Plinsko polnjene celice.** Pri tem postopku zložimo pripravljene čiste komplete z vstavljenimi spajkami v vakuumsko peč, evakuiramo do visokega vakuuma in do temperature pod tališčem spajke ter nekaj časa razplinjamo materiale. Nato z zaprtjem VV-ventila prekinemo črpanje in vpustimo želeni plin, ki napolni vso retorto in tudi notranjost pripravljenih celic. Ob dvigu temperature spajka zalije špranjo in s tem je plin ujet v zaprto celico. Primer za tovrstno spajkanje v vakuumu in v inertnih plinih so plinski prenapetostni odvodniki. Za končno zapiranje se navadno uporablja evtektična spajka 72Ag28Cu s tališčem 780 °C.

**Sestavni deli znanstveno-raziskovalnih naprav,** kot so pospeševalniki, aparature za raziskavo materialov in površin. Taki deli so npr.: visokovakuumske prevodnice, merilne glave, IG-črpalke, elektronski mikroskopi, elektronski in ionski izviri ipd. V njih so z vakuumskim spajkanjem izdelane predvsem električne prevodnice in spoji s kovino z visokim tališčem. Za standarden spoj na metalizirano keramiko se za material sodelujočih kosov uporabljata baker in zlitina kovar (FeNiCo), za spajko pa zlitina AgCu (72/28) s tališčem pri 780 °C. Za spajkanje molibdena in volframa je treba uporabiti spajke s tališči nad 1200 °C, kar zahteva peči z višjimi temperaturami. Z nekaj izkušnji in iznajdljivosti lahko za nekatere primere



**Slika 6:** Molibdenska elektroda ( $D = 6$  mm), spajkana z bakrom v keramični izolator plinskega prenapetostnega odvodnika



zadovoljivo spojimo molibden tudi z manj priporočeno spajko, ki ima nižje tališče (npr. baker, **slika 6**).

Spoji keramika-kovina se izdelujejo s postopkom spajkanja v vakuumu ali v inertni atmosferi, spoji steklo-kovina pa samo pri določenem tlaku primerne plina. Pri temperaturah nad pribl. 750 °C se namreč začno v vakuumu iz stekla izločati mehurčki razpadlih sestavin stekla.

### Manj zahtevna spajkanja

Vakuumsko spajkani so številni deli za hladilno tehniko, avtomobilsko industrijo in komponente kirurških medicinskih naprav, ki morajo biti predvsem lepi in tesni (**slika 7**). Spajkamo jih lahko v srednjem vakuumu ali celo v grobem vakuumu, pri tem pa se na koncu postopka pogosto dodaja malo vodika za očiščenje površine.

Zelo lepe spoje med komponentami iz nerjavnega jekla dobimo z ustreznimi spajkami v obliki paste, čeprav jih segrevamo le v grobem vakuumu ali v inertni atmosferi. Primer za to je npr. izdelava izmenjevalnikov toplote, kjer je treba na stene posod prispajkati hladilne cevke, ali kjer spajkamo po dve profilirani

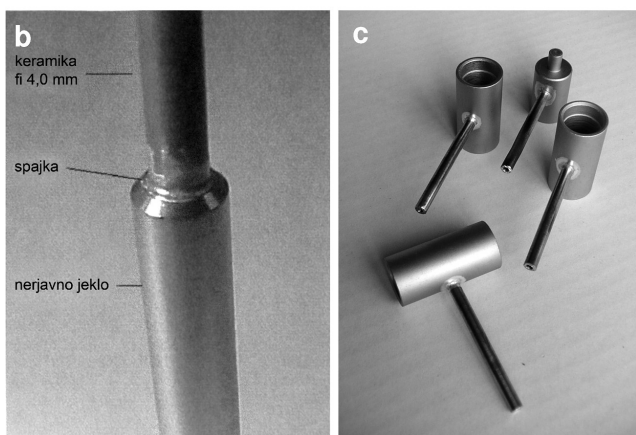
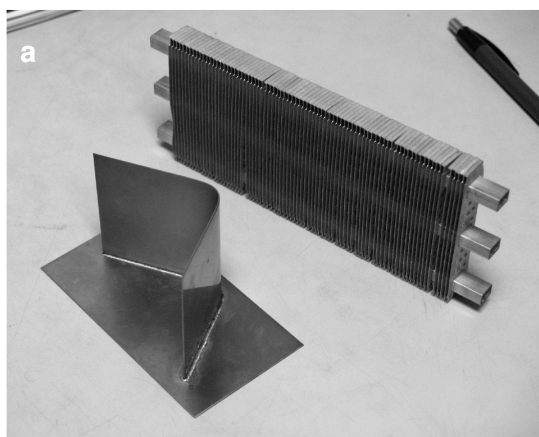
kovinski plošči v enotno steno, prepreženo s kanali za pretok tekočine.

### 5 IZKUŠNJE IN NAPOTKI

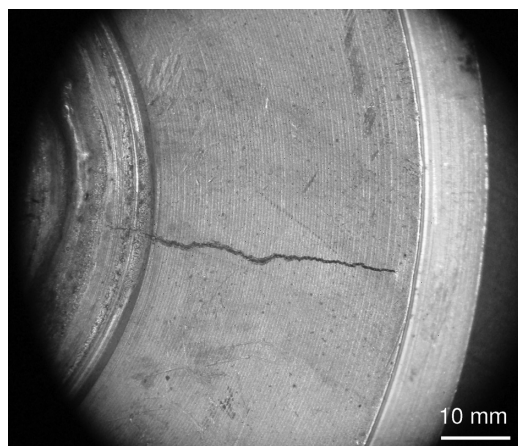
Pri izbiri nove spajke upoštevamo predvsem temperaturo taljenja oz. spajkanja in omočljivost obeh partnerskih kovin. Ne smemo pa pozabiti na naslednje:

- V večini primerov je ugodno, da izberemo evtektično spajko; pri tem imamo lepo definirano tališče in s tem zgornjo omejitev segrevanja.
- Kadar je predvideno večkratno zaporedno spajkanje na sestavljenem obdelovancu, moramo za prva spajkanja uporabiti tiste spajke z višjimi tališči, da pri naslednjih segrevanjih ne pride do medsebojnih premikov.
- Kadar spajkamo zlitino kovar z zlitino AgCu (72/28), segrevanje ne sme trajati predolgo (npr. ponovljeno spajkanje), ker se v kovarju pojavijo razpoke (**slika 8**).
- Dobro je po naših izkušnjah in priporočilih drugih najprej narediti nekaj preizkusov s svojimi sestavnimi deli in v zahtevnejših primerih tudi preizkusiti različne spajke. Spoj preizkusimo na tesnost, krhkost oz. elastičnost, električno prevodnost, trdnost itd.
- Pred vpeljevanjem proizvodnje se priporoča narediti več poskusov z izbranimi sestavnimi deli in v zahtevnejših primerih tudi preizkusiti različne spajke. Spoje je treba glede na zahteve preizkusiti na tesnost in trdnost.

**Debelina spajke.** Optimalne debeline vezivnega sloja so med 0,03 mm in 0,08 mm. Pri lepo soležnih gladkih površinah izbiramo nižje vrednosti, pri »slabših« površinah pa gremo proti 0,1 mm in včasih tudi nekaj stotink več. Iz teh priporočil in iz zelene



**Slika 7:** Primeri lepih spojev a) toplotni izmenjevalnik s poskusnim vzorcem, b) vžigna elektroda za dizel motorje, spajkana s pasto, c) preizkusni vzorci teles za nov tip plinskega odvodnika



**Slika 8:** Kadar zlitino kovar spajkamo s spajko, ki vsebuje srebro (npr. AgCu-72/28, ki je standardna spajka za elektronske sestavne dele), nastanejo razpoke v osnovnem materialu.

geometrije spajke (kolobar, žični obroček) definiramo končno obliko in dimenzije spajke. Sem spada tudi priprava komponent z natančnimi dimenzijami, ki definirajo režo. Kasneje praksa pokaže, ali je treba količino spajke dodatno povečati ali zmanjšati.

**Oblikovanje spojev** je stvar konstruktorjev, ki skrbijo za trdnost, tesnost, lepoto in funkcionalnost. Mesto, kamor spajko namestimo, naj bo tako, da stečenje spajke (v pripravljeno režo) ne povzroči premika enega sestavnega dela proti drugemu.

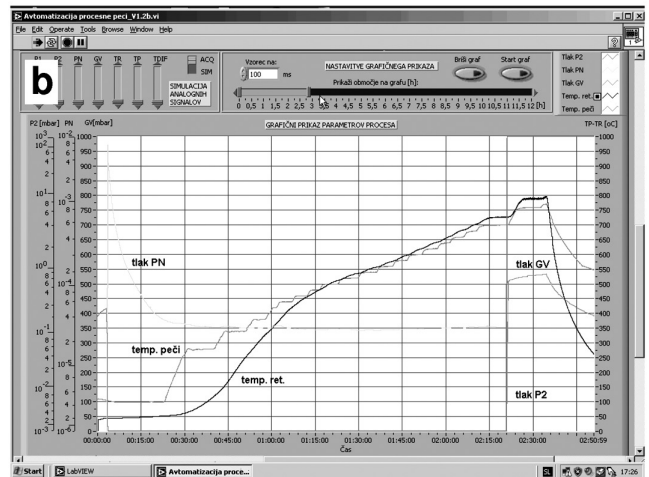
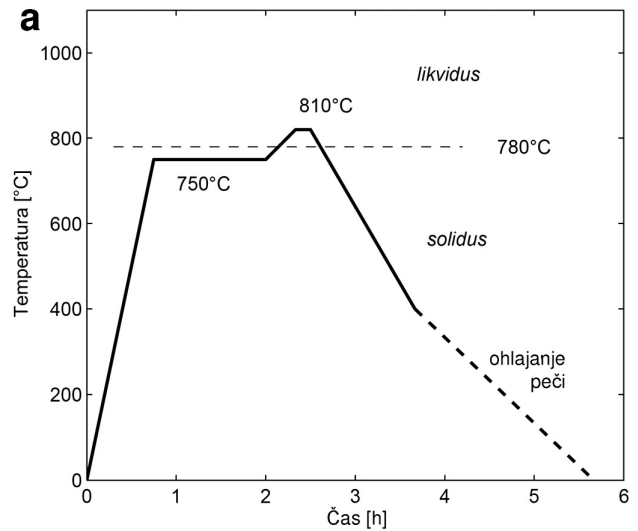
**Priprava materialov** pred spajkanjem: grobo pranje, razmaščevanje, končno čiščenje in izplakovanje ter sušenje. Naštetim operacijam se pri zahtevnejših izdelkih posvetimo do najmanjše podrobnosti. Tako pri razmaščevanju postopek lahko ponovimo v čistejšem detergentu; obvezna je uporaba ultrazvočne kopele. Po izplakovanju detergenta z navadno vodo operemo vzorce še z deionizirano vodo. V kopelih morajo biti vzorci postavljeni ločeno in tako obrnjeni, da so oblite vse površine (brez ujetih mehurčkov v odmaknjenih kotih) in da pri odcejanju lahko odteče vsa tekočina. Za prestavljanje v sušilne komore in za shranjevanje se uporabljajo čiste pincete, rokavice, posode s pokrovi itd. Za različne nivoje čistoče ponujajo proizvajalci standardne laboratorijske pripomočke in opremo.

**Predhodno izplinjanje.** Pri velikih zahtevah osnovne materiale predhodno tudi razplinimo v visokem vakuumu. Na koncu razplinjevanja in pred začetkom ohlajanja lahko z majhnim vpustom vodika v komoro (100–300 mbar za nekaj minut) odstranimo morebitne ostanke oksidov na površinah.

Za točno **pozicioniranje sestavnih delov med spajkanjem** posamezne sestavne dele namestimo v posebej pripravljeno orodje – navadno iz grafita.

**Namestitev spajke.** Nasprotno od ročnega spajkanja, kjer spajko lahko dodajamo sproti, se v pečeh spajka, nameščena na spojno mesto, razlije v režo in njeno okolico. Koliko prostora zavzame, je odvisno predvsem od vstavljenega količine spajke in od velikosti pripravljene reže. Natančna konstrukcija reže je še posebej pri serijski proizvodnji zelo pomembna za zagotavljanje trdnosti in tesnosti spoja.

**Čas spajkanja.** Vložek naj bo na delovni temperaturi čim krajši čas – po možnosti manj kot 1 min. To zagotavlja, da se spajka ne bo razširila iz špranje po površini (pri predolgem času lahko celo večina spajke izgine iz špranje). Kadar je v peči večje število vzorcev, je pomembno, da ima peč temperaturno polje s čim manjšim odmikom od imenske nastavitve; v nasprotnem primeru so nekateri vzorci lahko pregreti, drugi pa nezaspajkani.



Slika 9: Temperaturni diagram segrevalnega postopka pri spajkanju (a) in v praksi pri inkapsulaciji plina (b)

**Temperatura spajkanja.** Če ni drugače predpisano, spajko segrevamo na delovno temperaturo, ki je 10–25 °C nad njenim tališčem.

**Manj zahtevni predmeti.** Za okrasne in podobne predmete, kjer je poudarek predvsem na videzu in čistoči/lepoti (in ki elektronsko niso zahtevni), lahko uporabljamo spajkalne paste in »cenejše« vakuumske naprave – tu zadoščajo že tlaki med  $10^{-3}$  in  $10^{-4}$  mbar.

**Čiščenje po spajkanju.** Težavo s težko odstranljivim  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  na nerjavnih jeklih se da preprečiti z dodajanjem vodika ob koncu postopka ali zaobiti ta postopek s spajkami v obliki paste, ki vsebujejo tudi talila. Mogoče je uporabiti tudi predhodno nikljanje.

**Temperaturni postopek v peči.** V veliko pomoč so nam časovni diagrami spajkanja, ki so pravzaprav dokumenti o poteku dogodka (slika 9). Navadno jih določimo sami, tako da z več zaporednimi poskusnimi spajkanji ugotovimo optimalni tlak ter časovne in tlačne omejitve. Če se material počasi ali premočno razplinja, prvi del strmine ni gladek, ampak stopničast,

ker vmes počakamo, da črpalni sistem ponovno doseže želeni vakuum. Postopek je seveda daljši, toda pri elementih visoke zahtevane čistoče je to nujno. Diagrami spajkanja, pri katerih v celico za stalno zapremo (inkapsuliramo) določen plin, je v sliko vrinjen tudi dogodek prekinitve črpanja in vpuščanje plina, kot je razvidno s **slike 9b**.

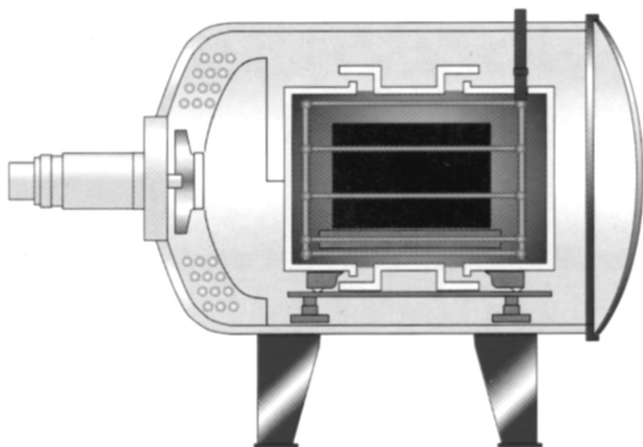
**Tesnost.** Sklope, ki morajo biti vakuumsko tesni, po spajanju vedno preizkusimo na tesnost. Najpogosteje uporabljamo metodo s helijevim masnim spektrometrom. Pri serijskem preizkušanju tesnosti spajkanih izdelkov si za hitrejšo delo izdelamo primeren priklonni element.

**Preizkus na trdnost** po navadi ni potreben.

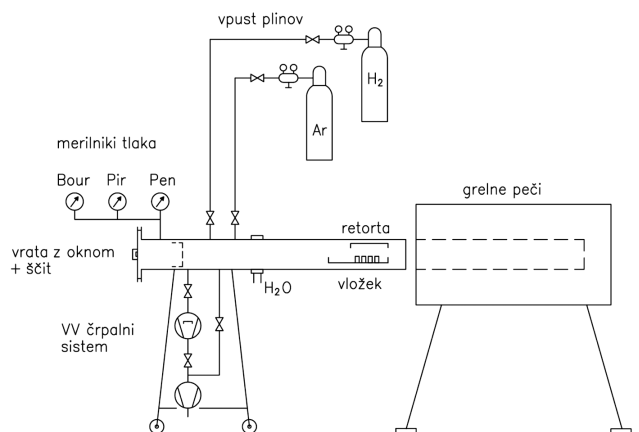
## 6 OPREMA

Predstavitev opreme podajamo z namenom pomagati tistemu, ki se pripravlja za nakup vakuumske peči. Kaj moramo pri tem vedeti, razmisliti, kaj definirati? Različne peči so konstruirane za različne namene, torej, kakšno peč je treba izbrati. Poudarjamo, da se je treba odločiti predvsem o naslednjih zadevah:

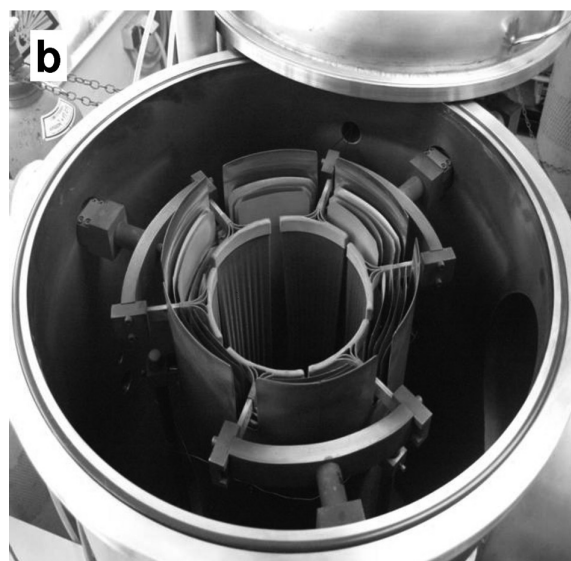
- ali poznamo zahteve in podrobnosti tehnološkega postopka;
- kakšna naj bo enakomernost temperaturne cone v delovnem prostoru ( $\Delta T$  med različnimi lokacijami v retorti);
- kakšen vakuum je potreben za predvideno tehnologijo;
- ali bomo občasno ali stalno uporabljali plinsko atmosfero, kajti to zahteva dodatne inštalacije za pline in vgrajen zaporni ventil proti črpalnemu sistemu;
- kakšna naj bo stopnja avtomatizacije celotnega sistema (izris diagrama » $T - t$ « že postaja stalna praksa);



**Slika 10:** Osnovni tip peči – vodoravna, masivni grafitni grelnik znotraj – vlaganje predmetov skozi vrata na desni strani



**Slika 11:** Eksperimentalna visokovakuumska peč s premičnim zunanjim grelnikom (kar omogoča hitro ohlajanje) in z inštalacijami za vpust različnih plinov



**Slika 12:** Primer VV-peči z navpično komoro za vlaganje predmetov z vrha (a) in pogled na molibdenske grelnike v notranjosti (b)



- zelena hitrost ohlajanja (dodatno pospešeno hlajenje s plini);
- postavitev peči, potrebne inštalacije, čistost prostora.

Osnovni sestavni deli pri vseh vakuumskih pečeh so: črpalni sistem, delovna komora, grelniki, električno napajanje, avtomatika in plinska inštalacija, kadar je predvideno delo s plini.

Proizvajalci vakuumskih peči imajo v svoji ponudbi zelo različne izvedbe (**slike 10–12**). Po namenu jih lahko razdelimo na proizvodne, večnamenske industrijske, laboratorijske in eksperimentalne. Glede na konstrukcijo se ločijo predvsem po tem, kje se nahaja grelnik. Tiste, pri katerih je grelnik v vakuumski posodi, imajo navadno grelne žice iz molibdena na keramičnih obešalih ali pa je grelnik izdelan iz grafitnih blokov, zloženih v obliki debelostenske skrinje, ki je direktno priključena na električno napetost. Vakuumska delovna posoda z velikimi vrati ima stene hlajene z vodo. Pri pečeh z grelniki v retorti so cevi iz ognjevarnega jekla (lahko tudi iz kremenca), grelna žica pa navadno iz zlitine »kantal«. Prednost je hitro ohlajanje in zato krajši delovni postopek, slabost pa razmeroma majhna grelna cona z enakomerno temperaturo.

Naj še omenimo, da se spajkanje v inertni atmosferi da izvesti tudi brez vakuumskih peči, in sicer z visokofrekvenčnim (VF) segrevanjem. Ta postopek se veliko uporablja v kovinski industriji. Vzorec se vstavi v prilagojeno indukcijsko tuljavo, v kateri je potem ob vklopu VF-segrevanja ta obpihovan z inertnim plinom. Prednost tega postopka je le lokalno pregretje vzorca na mestu spoja in hitro delo.

## 7 SKLEP

Spajkanje je pri kovinah osnovni način spajanja. S pojavom metalizacije keramike (v letih 1970–1980) so se spajkani spoji razširili tudi na področje keramike, kar je v tehniki pomenilo velik skok naprej. Vakuumsko spajkanje ima naslednje kvalitete:

- zelo močan spoj, včasih celo trdnejši od osnovnih gradnikov;
- možnost spajanja različnih materialov;
- spajkanje in kaljenje je omogočeno v enem postopku;
- v enem procesu je omogočeno spajanje velikega števila kosov;
- možnost doseganja velikih dimenzijskih točnosti;
- mogoči so večkratni spoji v eni spajkalni operaciji;
- visoka čistoča spoja; povsem nekontaminirane površine so primerne za uporabo v prehranske in medicinske namene ter tudi za izdelavo UVV-komponent;
- niso potrebna talila in zato ne pride do motečih površinskih reakcij.

Predstavljene so osnove spajkanja, izkušnje z izdelavo vakuumskih spojev, široke možnosti izbire opreme in napotki za tistega, ki se spušča na to zanimivo tehnično področje.

## 8 LITERATURA

- W. Pupp, H. Hartman, *Vakuumentchnik*, Carl Hanser Verlag, München, 1991
- H. Katz: *Technologische Grundprozesse der Vakuumelektronik*, Springer Verlag, Berlin, 1974
- B. Erjavec, L. Irmančnik - Belič, M. Jenko, *Materiali in tehnologije*, 37 (2003) 6, 359–363
- R. Rozman, F. Brecelj, A. Pregelj, *Interna poročila RR-oddelka Iskra Zaščite (obdobje 2003–2013)*
- P. Panjan, *Vakuunist*, 20 (2000) 3/4, 34–41