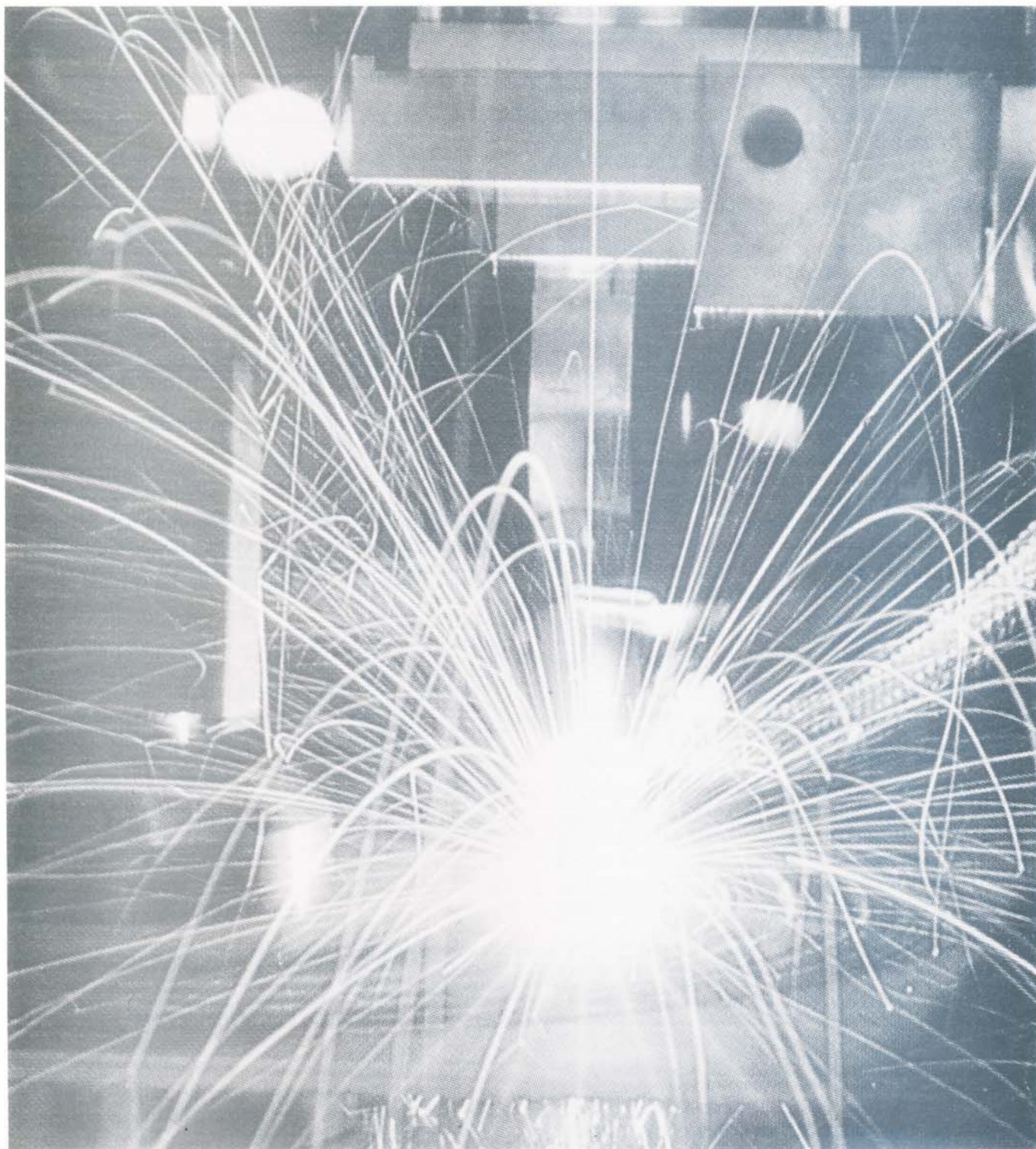


VAKUUMIST

GLASILO DRUŠTVA ZA VAKUUMSKO TEHNIKO SLOVENIJE

LJUBLJANA, oktober 92

ŠT. 28, 1992/3



VSEBINA

- Materiali v vakuumski tehniki (F. Breclj)

- Kovinski mehovi v vakuumski tehniki (J. Gasperič)

- Visokotemperaturne superprevodne tanke plasti (A. Cvelbar)

- Optimiranje vakuumske toplotne obdelave rezilnih orodij iz hitroreznih jekel (V. Leskovšek, B. Ule, A. Rodič, D. Lazar, M. Pogačnik)

- Varjenje vakuumskih komponent iz nerjavnega jekla (M. Drab)

- Nasveti (J. Gasperič)

- Novice DVT Slovenije

- Izobraževanje

Slika na naslovni strani:

Standardni postopki varjenja, ki se uporabljajo pri izdelavi vakuumskih sistemov in komponent so: TIG in mikroplazemsko varjenje ter varjenje z laserskim ali elektronskim curkom. Prve tri postopke uporabljajo tudi na Inštitutu za elektroniko in vakuumsko tehniko. Slika na naslovni strani prikazuje varjenje z laserskim curkom (posnetek je iz Leybold-ovega prospekta).

- VAKUUMIST
- Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije
- Glavni in odgovorni urednik Peter Panjan
- Uredniški odbor: Andrej Demšar, dr. Jože Gasperič (urednik za področje vakuumske tehnike in sistemov), dr. Monika Jenko (urednica za področje vakuumske metalurgije), dr. Alojzij Križman, mag. Vinko Nemanič, Marijan Olenik, Bojan Paradiž, Andrej Pregelj, dr. Vasilij Prešern, mag. Bojan Povh in dr. Anton Zalar
- Lektorja: dr. Jože Gasperič in mag. Bojan Povh
- Naslov: Uredništvo Vakuumista, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 61111 Ljubljana, tel. (061)267-341
- Številka žiro računa: Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, 50101-678-52240
- Grafična obdelava teksta Jana Strušnik
- Grafična priprava in tisk Biro M, Žibertova 1, Ljubljana
- Naklada 400 izvodov

Revijo sofinancira Ministrstvo za znanost in tehnologijo.

MATERIALI V VAKUUMSKI TEHNIKI

Franc Brecelj, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 61111 Ljubljana

MATERIALS IN VACUUM TECHNIQUE

ABSTRACT

The most significant phenomena in vacuum technique, i.e. gas permeation through solid materials and gas desorption from solid surfaces are described from practical point of view and most frequently used materials in vacuum technique are introduced.

POVZETEK

V članku sta opisana v vakuumski tehniki posebej pomembna pojava, permeacija plinov skozi trdne materiale in razplinjevanje, to je sproščanje adsorbiranih plinov s trdnih površin v vakuum. Predstavljeni so tudi najbolj pogosto uporabljeni materiali.

1 UVOD

Materiale, ki jih uporabljamo v vakuumski tehniki, lahko glede na namembnost uvrstimo v eno od treh velikih skupin:

- konstrukcijski materiali
- tesnila
- posebni materiali

V skupini posebnih materialov so npr. getri, s katerimi ohranjamo visoki vakuum v izdelkih (npr. barij in cirkonij v elektronkah), adsorbenti za vodo in druge pare (zeoliti, aktivno oglje), olja za črpalke in podobno.

Za konstrukcijske materiale in tesnila velja, da morajo poleg običajnih lastnosti, ki so pomembne za uporabnost materialov, kot so kemijska in toplotna odpornost, ustrezni termični raztezki, mehanska trdnost in podobno, imeti še dve za vakuumsko tehniko specifični lastnosti.

Morajo biti neprepustni za pline in ne smejo se preveč razplinjevati.

Čeprav na prvi pogled izgleda, da je izbira na osnovi teh dveh kriterijev enostavna, temu ni tako, saj je odvisna od stopnje vakuuma, ki jo v konkretnem primeru potrebujemo. Materiali, ki so z vakuumskega gledišča najboljše, so namreč obenem tudi dragi in jih relativno težko obdelujemo. Smiselno jih je uporabljati le tam, kjer so nujni. Za pravilno odločitev moramo oba pojava čim bolje poznati. Posebej si bomo ogledali še uporabnost najpomembnejših kovin, stekla, polimerov (izraz "plastičnih" ni popoln) snovi in olj.

2 PREPUSTNOST ZA PLINE /1/

Pojavu, ko se plini na visokotlačni strani raztapljajo v trdni snovi, na vakuumski strani pa izstopajo, pravimo permeacija. Intenzivnost permeacije je odvisna tako od snovi kot od vrste plina.

Velja praktično pravilo, da so običajne debeline sten iz kovine ali stekla, ki so potrebne zaradi trdnosti elementa, obenem za zrak neprepustne. To pravilo velja tudi še do temperature nekaj sto stopinj celzija. Izjema

so seveda porozni materiali, kot npr. slabi odlitki, kapilare pri vlečenih materialih, drobne razpoke na zvarih in v steklu, kjer vzrok za puščanje ni permeacija.

Bolj zapletene so razmere pri vodik, saj ga nekatere kovine kar dobro prepuščajo. Najbolj značilen primer je paladij (Pd), kjer to njegovo lastnost celo uporabljamo za čiščenje vodika. Vodik lahko prihaja v vakuumu tudi skozi steno iz železa ali ogljikovega jekla, ki je hlajena z vodo, ker na meji z železom in vodo nastaja atomski vodik, ki potem difundira naprej v vakuum. Skozi srebro difundira kisik, kar lahko pri višjih temperaturah uporabimo za doziranje majhnih količin čistega kisika.

Za stekla na splošno velja, da najbolj prepuščajo (permeacija) helij (He), delno tudi vodik (H₂), so pa med njimi velike razlike (faktor okrog 10⁵) /2/. Najmanj ju prepuščajo svinčeva (Pb) stekla, najbolj pa kremeno-steklo. Prehajanje plina skozi steklo je za večino praktikov zanemarljivo, upoštevati ga je treba v UVV tehniki.

Polimerne snovi prepuščajo pline bistveno bolj kot steklo, zato se jih pri konstrukcijah vakuumskih sistemov izogibamo. Za helij so npr. elastomeri tako prepustni, da nas njegovo prehajanje skozi tesnilke lahko moti pri iskanju netesnosti s helijevim iskalnikom (leak detektorjem).

3 RAZPLINJEVANJE /1/

Vsaka snov, ki pride iz atmosfere v vakuum, oddaja pline, nekatere tudi pare. Viri teh emisij so lahko:

- pare same snovi, npr. ogrete kovine ali mehčala pri termoplastih
- desorpcija adsorbiranih plinov
- difuzija plinov, raztopljenih v notranjosti.

V prvem primeru najlaže rešimo težavo s tem, da uporabimo take snovi, ki pri temperaturi, kateri so izpostavljeni v vakuumu, še nimajo škodljivega ravnotežnega parnega tlaka. Ta meja je odvisna od posameznega primera, vendar ta tlak navadno ne sme prekoračiti 1.10⁻⁴ mbar.

Plini, ki se adsorbirajo na površinah na zraku, so: N₂, O₂ in H₂O. Količina teh plinov na kovinah je precejšnja. Pogosto je plinov toliko, da če jih desorbiramo s površine 1 m² v volumen 1l, dobimo tlak okrog 20 mbar. Količina je močno odvisna od čistosti in gladkosti površine. Večino adsorbiranega plina predstavlja voda (okrog 90 %), ki jo tudi najteže odstranimo s površin. Desorpcijo pospešujemo z gretjem. Velja približno pravilo, da se pri vsakem povišanju

temperature za 100°C poveča desorpcija za 10-krat. Za doseganje ultravisokega vakuumu moramo kovine, stekla in keramiko med črpanjem segreti nad 300°C.

V trdnih snoveh raztopljenih plin je z navadnimi razplinjevalnimi postopki zelo težko odstraniti. Potrebna je namreč previsoka temperatura. To velja še posebej za elastomere, kjer s temperaturo povečujemo tudi prepustnost, tako da razplinjenja sploh ne moremo doseči. V primerih, ko rabimo ultravisoki vakuum, uporabljamo kovinske materiale, ki so bili razplinjeni že pri metalurški izdelavi, pri temperaturi nad tališčem.

4 KONSTRUKCIJSKE KOVINE

Jekla z različnim deležem ogljika /1/

Navadno (ogljikovo) jeklo je uporabno le do tlaka 10^{-5} mbar. Za nižje tlake je potrebno gretje, vendar tega jekla ne moremo dobro površinsko razpliniti, ker tedaj iz notranjosti oddaja pline (npr. CO). Ker je relativno poceni in so tehnologije za njegovo obdelavo poznane, ga uporabljamo, kjer le ustreza zahtevam.

Nerjavna jekla /1,3,4/

Nerjavna jekla iz skupine avstenitnih jekel 18Cr 18Ni (npr. AISI 304, prokron 11) uporabljamo za gradnjo elementov vakuumskega sistema, kjer je potrebna korozijska odpornost ali doseganje visokega vakuumu. Skoraj vedno je konstrukcija naprav taka, da je potrebno tudi varjenje spojev. V teh primerih je priporočljivo uporabljati posebno nerjavno jeklo z manj ogljika in z dodatkom posebnih legirnih elementov, npr. titana (Ti), niobija (Nb), cirkonija (Zr), ki preprečujejo nastanek razpok na zvarih. Takšno jeklo je po DIN oznaki, npr. X5 CrNi: 18/9.

Avstenitna jekla lahko v primeru, ko se ne zahteva, da je material nemagnetna, zamenjamo s cenejšimi superferitnimi jekli, ki so tudi nerjavna.

Aluminij in njegove zlitine /1/

Aluminij kot konstrukcijski material se uporablja kot mehansko trdna zlitina silumin (Al-Si). Iz nje so izdelani razni fittingi, cevi itd... Aluminijasti neprofesionalni odlitki so včasih porozni. V takih primerih lahko luknje zamašimo z impregniranjem, npr.: z epoksi smolami, vendar tako popravljene izdelki niso primerni za visoki vakuum. Parni tlak Al je nizek, zato je načeloma uporaben za ultra visoki vakuum, vendar pa zaradi njegove premajhne trdnosti nastopajo težave pri izvedbi razstavljivih spojev, ki morajo vzdržati pregrevanje in moramo zato za tesnjenje uporabiti kovinska tesnila (npr. Cu, Au). Tudi varjeni spoji so pri aluminiju kritični. Le z uporabo posebnih vrst Al zlitin, tako pretaljenih v vakuumu, da ne vsebujejo raztopljenega vodika, dosežemo tesne zveze, ki vzdržijo pregrevanje /5/.

Baker in njegove zlitine /1/

Baker ni značilen konstrukcijski material, vendar se v posebnih primerih uporablja tudi v ta namen. Predvsem je pomemben, kjer je potrebna velika toplotna in

električna prevodnost, npr.: za prevodnice za večje tokove. Od bakrovih zlitin uporabljamo včasih razne vrste medenin, vendar samo v primerih, ko teh izdelkov ne grejemo. Kot vemo, vsebujejo medenine cink (Zn) (od 5% do 45%), ki ima visok parni tlak. Že pri 200°C v vakuumu tako močno odpareva, da postane površina medenine bakreno rdeča. Če črpalni sistem onesažimo z Zn, ga zelo težko zopet očistimo. Zato moramo paziti, da ne uporabljamo v ogrevanih vakuumskih napravah niti medeninastih vijakov. Izberemo vijake iz nerjavnega jekla.

Zelo čist baker (z oznako OFHC) je pomemben material za tesnila v ultra visokem vakuumu in za izdelavo močnostnih vakuumskih elektronk /3/.

Vtalne kovine in zlitine /3/

Ta skupina kovin in zlitin nam omogoča izdelavo električnih prevodnic in električno izolacijo med posameznimi deli vakuumskega sistema. Za spajanje s steklom se največ uporablja železove zlitine: za steklo z večjim raztezkom zlitine na osnovi Fe-Ni (vacovit), za vtaljevanje v steklo z majhnim raztezkom pa zlitine na osnovi Fe-Ni-Co (kovar, fernico, nilo-k, vacon). Te zlitine se uporablja tudi za spoje z glinično keramiko.

V primerih, ko potrebujemo vtalke v stekla z majhnimi raztezki in visoko temperaturo zmeščanja (npr. kremenovo steklo), uporabljamo kot vtalni kovini molibden (Mo) in volfram (W).

5 KOVINE S POSEBNIMI LASTNOSTMI

Titan /1/

Uporablja se kot getrski material v ionsko-getrskih črpalkah in v črpalkah na izparevanje. Ima izredno sposobnost vezave nekaterih plinov v trdne spojine.

Zlato /1,4/

Tudi zlato je včasih v vakuumski tehniki nenadomestljivo. Ker je zelo mehko in ima nizek parni tlak tudi pri višjih temperaturah, se uporablja za tesnila in pri posebnih visokovakuumskih ventilih. Pomembne so tudi zlitine zlata, ki se uporabljajo kot specialni visokotemperaturni loti, ki ne korodirajo.

Živo srebro /1,4/

Lastnost živega srebra (Hg), da je pri sobni temperaturi tekoče, uporabljamo v merilnikih vakuumu (npr. McLeod, U-manometer ipd.) in včasih za pogonsko tekočino v difuzijskih črpalkah. Že pri sobni temperaturi odpareva in ker so njegove pare strupene, moramo pri delu z njim poskrbeti za ustrezne varnostne ukrepe.

6 VAKUUMSKI LOTI (SPAJKE) /6/

Spajkanje se pri vakuumskih tehnologijah veliko uporablja, vendar niso vsi loti za to uporabni. Predvsem ne smejo vsebovati kovin, ki imajo visoke

parne tlake, tako da odpade cela vrsta Ag lotov, ki vsebujejo Cd ali Zn. Ti loti pokrivajo temperaturno območje med 500°C in 700°C, ki ga z drugimi loti ne moremo nadomestiti. Prav tako manjkajo vakuumski loti za območje med 300°C in 500°C. Dobro pa je pokrito temperaturno območje med 710°C in 2000°C.

Pri izdelavi vakuumskih naprav in izdelkov se največ uporablja Ag-Cu lot s tališčem pri 780°C in dobro omočljivostjo. Podobno lastnost ima tudi Cu-Au (70 % Cu, 30 % Au) s tališčem pri 980°C. Zelo dobro omočljivost imajo tudi loti, ki vsebujejo paladij. Pokrivajo območje od 815°C do 1250°C in imajo odlične mehanske lastnosti. Najnižjo temperaturo med trdimi loti, ki so uporabni v vakuumu, ima lot s sestavo 64 % Ag, 26 % Cu, 10 % indija, njegova delovna temperatura je 710°C.

Kadar spajamo elemente, ki nikoli niso ogreti nad 300°C, lahko uporabimo mehke lote, ki vsebujejo kositer (Sn), svinec (Pb), srebro (Ag), in indij (In) (ne pa Cd ali Zn). Pri projektiranju teh spojev moramo vedeti, da ti loti niso nosilni in da pri trajni obremenitvi polzijo, posebno neugodne so strižne obremenitve.

Za spajkanje bakra in njegovih zlitin je uporaben tudi fosforni lot (15 % Ag, 5 % P, 80 % Cu). Temperatura lotanja je 700°C, vendar pa se ti spoji ne smejo ogrevati preko 100°C, ker ima fosfor razmeroma visok parni tlak /1/.

7 STEKLO /1/

Steklo je v preteklosti imelo večjo vlogo kot danes. Obdelava stekla je zahtevna tehnologija, potrebni so strokovnjaki, zato se ga, če teh nimamo, izogibamo. Je pa nenadomestljivo, kjer je potrebna poleg vakuumskih lastnosti tudi prozornost (npr. Hg manometri). Uporablja se tudi zaradi dobrih električnih izolacijskih lastnosti. Kadar je možno organizirati masovno proizvodnjo, je lahko tudi poceni (npr. pri žarnicah, kontaktnikih). Z različno kemijsko sestavo lahko dobimo stekla z zelo različnimi temperaturnimi raztezki. Razlikujemo dve osnovni skupini stekel. Tisti z večjim raztezkom (okrog $90 \cdot 10^{-7}/K$) pravimo mehka stekla. K tem steklom sodijo t.i. svinčeva stekla, ki imajo majhno prepustnost tudi za H_2 in He in se uporabljajo kot ohišja elektronk (npr. TV slikovna elektronka).

Trda stekla imajo raztezke v območju $30 - 50 \cdot 10^{-7}/K$. Vzdržijo veliko večje temperaturne razlike kot mehka, zato se uporabljajo kot gradiva za laboratorijske vakuumске naprave in posode.

Za spoje s posameznimi kovinami so izdelana posebna stekla, ki imajo lastnosti tako prilagojene, da pri spajanju ne nastajajo v njih tolikšne napetosti, zaradi katerih bi razpokala. V mehka stekla lahko vtalimo platino (Pt) in dumet (posebna žica, ki ima jedro iz Fe-Ni, okoli katerega je bakren plašč, površina pa je prekrita z boraksom ali nikljem in posebno Fe-Ni zlitino vacovit). Obstajajo še posebna trda stekla za spoje z molibdenom in kovarjem (zlitine Fe-Ni-Co) z raztez-

kom $\sim 5 \cdot 10^{-6}/K$ in z volframom (raztezek $\sim 4 \cdot 10^{-6}/K$). Najbolj uporabljana konstrukcijska stekla, npr. pyrex, duran, boral, imajo raztezek $\sim 3.5 \cdot 10^{-6}/K$ in ravno zato za neposredno vtaljevanje kovin niso primerna. Od vseh stekel ima daleč najmanjši raztezek kremenovo steklo ($\sim 0.6 \cdot 10^{-6}/K$), ki ga lahko žarečega pomočimo v vodo in ne bo počilo. Uporablja se npr. za specialna svetila in za retorte visokotemperaturnih vakuumskih peči (do 1200°C, posebna kvaliteta do 1300°C).

8 KERAMIKA /3/

Podobno kot steklo lahko tudi keramiko trdno in vakuumsko tesno spojimo s kovinami. Zato jo v vakuumu lahko uporabljamo za izolacijo tokovnih prevodnic, ki jih lahko ogrevamo do 500°C in več. Največ se uporablja keramika z visokim odstotkom glinice (nad 92 % Al_2O_3), ki je metalizirana po posebnem Mo-Mn postopku, da jo lahko zlotamo v peči s Fe-Ni-Co zlitinami, ker imajo podoben raztezek, ali z brezoksidnim (OFHC) bakrom, ki je dovolj mehak, da se prilagaja keramiki.

9 ADSORBENTI /7/

Adsorbenti so porozni materiali, ki imajo zaradi svoje luknjičave strukture na enoto volumna ogromno površino (do nekaj m^2/cm^3). Adsorbirajo vodno paro, pare olj in drugih organskih snovi, pa tudi permanentne pline (kisik, dušik, argon). Izbira adsorbenta je odvisna od tega, kaj želimo vezati nanj.

- molekularno sito tipa 13X uporabljamo v sorpcijskih črpalkah za črpanje permanentnih plinov. Pri ohlaiditvi do temperature tekočega dušika (-196°C) se njegova sorpcijska sposobnost še močno poveča, ko pa se ogreje, se vezani plini zopet sprostijo in črpalka je pripravljena za novo črpanje.
- molekularno sito tipa 13X je zelo primerno za odstranjevanje vodne pare. Oljne pare pa sorbira dobro le, dokler je suho, kar pa je v praksi redkejši slučaj.
- aktivna glinica (γ modifikacija) ima manjšo kapaciteto črpanja za vodne pare kot omenjeno molekularno sito 13X, vendar pa je njena sorpcijska sposobnost za oljne pare sorazmerno malo odvisna od zasičenosti z vlago, zato je najbolj priporočljivo sorpcijsko sredstvo za pasti, ki so montirane za rotacijskimi črpalkami.
- aktivno oglje malo sorbira vodno paro, zato se sorpcija oljnih par v prisotnosti vlage ne zmanjšuje. Ima pa manjšo kapaciteto črpanja kot glinica, poleg tega pa v vakuumski tehniki pogosto želimo hkrati sorbirati vse pare, tudi vodo. Aktivno oglje dobro veže pare organskih topil, te pa so v primerih, kjer uporabljamo vakuumsko tehniko, bolj redkokdaj prisotne v večjih količinah.

Omenili smo že, da je regeneracija adsorbentov za permanentne pline zelo enostavna, saj je dovolj, da se ogrejejo na sobno temperaturo. Le občasno jih je treba ogreti za več ur na okrog 200°C, da odstranimo vodo, ki je močneje vezana. Podobno regeneriramo

tudi, če je v adsorbentu vezana le voda. Regeneracija adsorbentov, nasičenih z zmesjo par organskih snovi in vode, pa je precej bolj problematična, zato jih navadno raje zavržemo in zamenjamo z novimi. Če se že odločimo za regeneracijo, jih moramo ogrevati nad 200°C ali celo 300°C. Hitrost dviganja temperature mora biti majhna, med regeneracijo mora skozi teči zrak, ki odnaša pare organskih snovi, preden te razpadejo na površini. Kljub temu del par navadno razpade, delno zamaši pore adsorbenta in ga tako bolj ali manj deaktivira.

delov rotacijskih črpalk. Tu ni posebno pomemben parni tlak pri sobni temperaturi, ampak mazivnost in viskoznost. Drugo področje uporabe olj so oljne difuzijske črpalke, kjer pa je pomemben predvsem parni tlak in temperaturna stabilnost, posebej še proti oksidaciji. Veliko se uporabljajo silikonska olja. Obstaja še specialno olje FOMBLIN (perfluoropolietilen) /8/, ki ne vsebuje vodikovih atomov in je kemijsko zelo stabilen. Uporablja se tako v rotacijskih kot difuzijskih črpalkah pri črpanju agresivnih par. Njegovo širšo uporabo omejuje visoka cena.

Pregled lastnosti v vakuumski tehniki največ uporabljenih elastomerov

Naziv in sestava	tržno ime	lastnosti	uporaba
naravna guma	latex	dobra raztegljivost	gibljive povezave
akrilnitrilbutadien	perbunan N	odpornost na olja	tesnila do 80°C
poliklorbutadien	neopren	kot prebunan	kot perbunan
silikonska guma	silopren	temp. odp.	tesnila do 150°C
fluorirana guma	viton	nizka permeacija	VV tesnila do 150°C

10 POLIMERNE SNOVI /1/

Polimerne (plastične) snovi se v vakuumski tehniki uporabljajo izjemoma kot konstrukcijski materiali, predvsem rabijo za tesnjenje. Razlikujemo tri velike skupine. Elastomeri, ki so elastični, termoplasti, ki se pri segrevanju na okrog 100°C zmehčajo in duroplasti, ki ostanejo tudi pri višjih temperaturah trdni (do 300°C).

Termoplasti

V vakuumski tehniki se zaradi cenenosti in kemijske odpornosti največ uporablja PVC (polivinilklorid), predvsem za cevi za nizki vakuum.

Duroplasti

Med duroplasti se v vakuumski tehniki največ uporabljajo epoksidne smole (araldit), in sicer za razna lepljenja. Uporabne so v vakuumskih sistemih, kjer ne potrebujemo vakuuma, ki bi bil višji od 10^{-6} mbar in se ne ogrevajo nad 180°C. Do 250°C lahko segrevamo tesnila, mehove v ventilih za visoki vakuum in cevi, če so iz teflona ali hostafllona (pogosto poimenovanih z okrajšavo: PTFE, iz politetrafluor etilen).

11 OLJA /1/

Olja uporabljamo v vakuumski tehniki za maziva in pogonske tekočine za difuzijske črpalke. Olja na osnovi ogljikovodikov so uporabna za tesnjenje gibljivih

12 SKLEP

Vakuumaska tehnika je obsežno tehnološko področje, zato se v njej uporabljajo najrazličnejši materiali. Kadar potrebujemo ultravisoki vakuum, potem lahko uporabimo le določene kovine, keramiko in steklo. Z nižanjem zahtev glede kvalitete vakuuma pa se izbira materialov razširi vse do polimernih snovi, kadar potrebujemo le grobi vakuum. V članku so opisane tiste lastnosti posameznih materialov, ki določajo njihovo uporabnost.

13 LITERATURA

- /1/ M. Wutz, H. Adam, W. Walcher: Theory and Practice of Vacuum Technology, Friedrich Vieweg Sohn, Braunschweig, 1989
- /2/ G.L. Weissler, R.W. Karlson, Vacuum Physics and Technology, Part II, Academic Press, 1979
- /3/ W.H. Kohl: Handbook of Materials and Techniques for Vacuum Devices, Reinhold Publ. Co. 1967
- /4/ W. Espe: Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik, Band 1,2 in 3. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1960
- /5/ E. Fromm, E. Gebhart, Gase und Kohlenstoff in Metallen, Berlin, Springer Verlag, 1976
- /6/ A.S. Gladkov, O.P. Podvigina, O.V. Černov: Pajka delatej elektrovakuumnyh priborov, Energija 1967
- /7/ B.X. Liu, Z.J. Yang: An investigation of the characteristics of different sorbents for trapping oil molecules, Proc. 8th Int. Vac. Congress, Cannes, 1980, Vol.2, str. 82-85
- /8/ L.Laurenson, G.Caporiccio: Perfluoropolyethers- Universal vacuum fluid, Proc. 7th Int. Vac. Congr., Dunaj, 1977, Vol.1, str. 263-266

KOVINSKI MEHOVI V VAKUUMSKI TEHNIKI

Dr. Jože Gasperič, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

Metal bellows in vacuum technique

Abstract

The properties and principles of design of metal bellows for the application in vacuum technique are described. Some practical examples of calculation are added for better understanding and practical use.

Povzetek

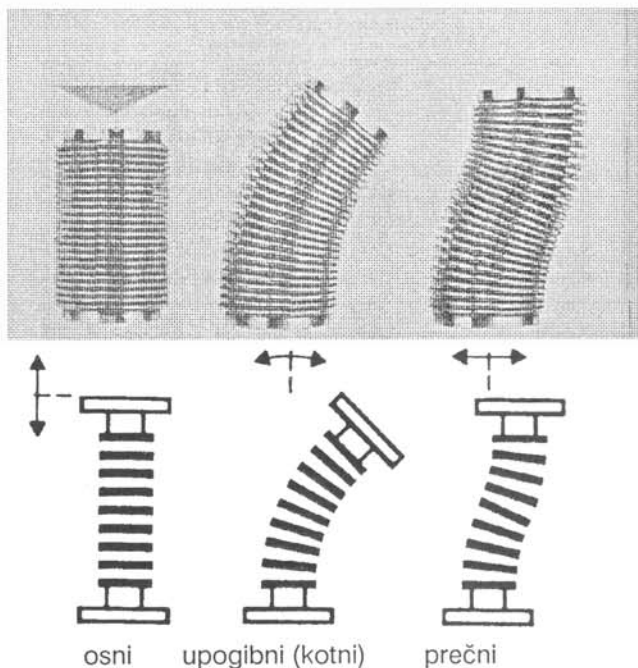
Članek obravnava kovinske mehove, njihove lastnosti ter osnove dimenzioniranja za potrebe v vakuumski tehniki. Osnove dimenzioniranja so opremljene z zgledi za boljše razumevanje oz. praktično uporabo.

1 Uvod

Kovinski mehovi so narebričene gibke cevi, ki jih uporabljajo predvsem v toplotni tehniki za kompenziranje temperaturnih raztezkov pri cevovodih, medtem ko imajo v vakuumski tehniki različno uporabnost, kot npr.:

- gibljive cevne povezave med posameznimi elementi zaradi mehanske prilagoditve pri montaži ali zaradi dušenja treslajev, ki jih povzročajo rotacijske črpalke in ki bi se sicer prenašali na druge dele vakuumskega sistema
- pomični element v ventilih in prenosnikih gibanja (translatorjih)
- temperaturni kompenzatorji v kriotehniki.

Poznamo več izvedbenih vrst kovinskih mehov in sicer: *navadne* (sl.1), *membranske* (sl. 2) in *miniaturne*, ki dovoljujejo različne pomike: *osne*, *upogibne* (kotne), *prečne* ter kombinacije le-teh (sl.1)



Slika 1. Osnovni pomiki kovinskih mehov

Temeljne zahteve, ki jih morajo izpolnjevati kovinski mehovi, ne glede na mesto, kjer jih uporabljamo, so: odpornost proti tlaku, vakuumska tesnost, temperaturna vzdržljivost, korozijska vzdržljivost (obstojnost), gibkost, zanesljivost in ekonomičnost ter dolga doba uporabnosti.

Materiali, iz katerih so izdelani kovinski mehovi, so predvsem avstenitna nerjavna jekla, bron (CuSn_6), tombak (CuZn_{20}) ter nikelj za miniaturne mehove. Poleg teh uporabljajo tudi druge materiale, predvsem zaradi posebnih lastnosti (titan, baker-berilij CuBe_2 ter nikljeve zlitine: monel 400, hastelloy C-276, inconel 600, incoloy 800 oz. 825)

Seveda pa ni materiala, ki bi zadovoljil vse zahteve. Avstenitna nerjavna jekla pokrivajo veliko število potreb, bron in tombak sta "neželezna" materiala, baker-berilij (CuBe_2) pa je zelo trd in primeren za merilne in regulacijske inštrumente zaradi velike prožnosti in majhne histereze.

V glavnem materiale za mehove hladno oblikujejo (valjanje, hidravlično stiskanje), razen miniaturnih mehov iz niklja (kemijsko oz. elektro nanašanje). Dodatna toplotna obdelava, razen za CuBe_2 , ni potrebna in je celo škodljiva. Za uporabo mehov pri temperaturi nad 500°C vzamejo toplotno odporna ali visokotemperaturna avstenitna jekla oz. nikljeve zlitine, sicer pa titan ali čisti nikelj.

2 Lastnosti kovinskih mehov

2.1 Odpornost proti tlaku in temperaturi

Za vsak kovinski meh mora proizvajalec navesti podatek za dovoljen tlak pri temperaturi 20°C , ki ga imenujemo tudi referenčni tlak p_n (bar) in je empirično določen. Pri izračunih ga uporabljamo ne glede na to, ali gre za zunanje ali notranje tlake pri osno pomičnih, upogibnih (kotnih) ali prečno pomičnih mehovah ter ne glede na njihovo dolžino.

Dovoljeni delovni tlak izračunamo tako, da zmanjšamo referenčni tlak v primeru toplotnih preobremenitev (stresov), pri velikih notranjih ali zunanjih tlakih zelo dolgih mehovah ter velikih zunanjih tlakov pri upogibnih in prečno pomičnih mehovah.

Referenčni tlak p_n je, kot rečeno, podan za temperaturo 20°C . Če je delovna temperatura višja, moramo to upoštevati in ga pomnožiti s termičnim redukcijskim faktorjem k_t , ki je tabeliran za vsak material posebej v odvisnosti od temperature, da dobimo dovoljeni delovni tlak (za avstenitna jekla je k_t npr. 0.76 pri 200°C , 0.61 pri 400°C , ki je tudi najvišja dovoljena temperatura), medtem ko je za visokotemperaturna jekla

(700°C, max.) 0.72 pri 200°C, 0.57 pri 400°C in 0.12 pri 700°C. Najvišja dovoljena delovna temperatura za mehove iz brona in tombaka je 250°C, za zlitino bakerberilij 200°C, za čisti nikelj pa 650°C.

Pri *dolgih* mehovih in *notranjem tlaku* je treba upoštevati še (zmanjševalni) faktor k_j , s katerim je treba pomnožiti referenčni tlak, da dobimo delovnega. Tudi ta je tabeliran [1]. Faktor k_j pada z drugo potenco glede na število reber in z naraščujočim številom letih kaj hitro pripelje do majhnih dovoljenih tlakov. Npr., pri notranjem premeru meha od 25 do 42 mm z 10 rebri je k_j enak 1, torej je notranji delovni tlak lahko kar enak referenčnemu, pri 20 rebrih je k_j le še 0.25 in je zato dovoljen notranji tlak le še četrtno referenčnega, pri 40 rebrih pa je k_j 0.06.

Pri *dolgih* mehovih in *zunanjem tlaku*, kar je pri večini vakuumskih izvedb (razen pri ventilih), pa moramo upoštevati zmanjševalni faktor k_a , ki je za zgornji zglede precej bolj ugoden kot k_j , in je pri 20 rebrih: $k_a = 0.6$, pri 40 pa 0.44. Referenčni tlaki p_n so pri navadnih mehovih iz nerjavnega materiala, brona oz. tombaka, ne glede na premer, razmeroma visoki (od 4 bar navzgor), zato faktorja k_a pri vakuumskih izvedbah (zunaj meha je atmosfera 1 bar, znotraj pa vakuum) z navadnimi mehovi ne bomo upoštevali, pač pa bo to potrebno za membranske in miniaturne mehove, kjer so referenčni tlaki (p_n) 10-krat nižji; p_n od 0.4 bar navzgor, odvisno seveda od notranjega premera in materiala.

Pri vsakem mehu lahko opravimo tudi tlačni preskus. Če vzamemo 1.3-krat višji tlak od delovnega, to še ne pripelje do stalne deformacije profila reber, zmanjša pa delovno dobo uporabnosti izdelka. Visoka upornost proti tlaku pomeni tudi večjo debelino stene, kar je v nasprotju z našo željo po dolgih elastičnih pomikih oz. gibkosti, kar dovoljujejo tanjša stena. To pomankljivost lahko delno odpravimo, če uporabimo mehove, ki imajo stene, sestavljene iz več posameznih tankih plasti.

Če bi pri tlačnem preskusu povišali tlak za tri- do desetkrat nad dovoljenim, potem bi prišlo do porušitve, pred njo pa do plastične deformacije meha.

Če nameravamo mehove uporabiti kot osnovni element za merilne ali regulacijske naprave, potem sme biti obremenitev le 70% dovoljene zaradi zmanjšanja histereze, s tem pa zagotovimo dobro ponovljivost in dolgo uporabnost.

2.2 Odpornost proti koroziji

Temeljno pravilo je, da mora biti material, iz katerega je izdelan meh, enake kvalitete, kot je kompletna sestava oz. cevje. Standardno nerjavno jeklo je odporno proti velikemu številu korozivnih medijev, poleg tega pa ima še dolgo uporabnost.

2.3 Potisk

Potisk je sila, ki je definirana kot zmnožek efektivnega preseka meha in delovnega tlaka. Ker deluje v vakuumski tehniki meh proti vakuumu (zunaj atmos-

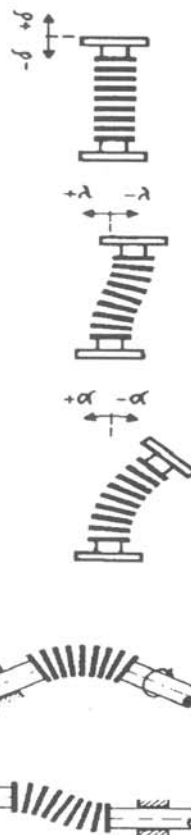
fera - znotraj vakuum) predstavlja delovni tlak tudi absolutnega. Efektivni presek meha lahko izračunamo po obrazcu:

$$a = (\pi/12)(d_1^2 + d_1d_2 + d_2^2)10^{-2} \text{ [cm}^2\text{]} \quad (1)$$

pri čemer je d_1 notranji premer meha (mm) in d_2 zunanji (mm). Oboje velja tako za navadne kot za membranske in miniaturne mehove. Izračun potiska je pomemben za vse aplikacije z mehovi, kar bomo predstavili v enem od zgledov.

2.4 Elastičnost in načini gibanja

Kovinski mehovi so gibljivi do različnih stopenj in se zaradi zunanjih sil in momentov gibljejo osno, upogibno (kotno) ali prečno (zmično) oz. kombinirano.



Vsakemu od teh načinov gibanja, ki jih povzročajo zunanje sile, nasprotujejo notranje, imenovane *deformacijska upornost*, ki je sorazmerna zunanji obremenitvi, dokler ta ostane v mejah elastičnosti. Sorazmernostni faktor imenujemo *vzmetnost*.

Navadni kovinski in membranski mehovi imajo svojo glavno elastičnost v osni smeri. To izrabljamo v največ primerih uporabe. Največjo trajnost imajo, če izkoristimo njihovo osno gibljivost v obeh smereh: kot raztezek (+δ) in stisk (-δ). Simetrična porazdelitev gibanja v obeh smereh (50/50%) omogoča največje število gibov.

Za membranske mehove (sl. 2) pa je najbolj ugodno, če je raztezek 20% (+δ) in stisk 80% (-δ).

Enako kot za navadne kovinske mehove pri osnem gibanju velja tudi za prečno in upogibno, kjer pa je često potrebno vgraditi "prednapete" mehove.

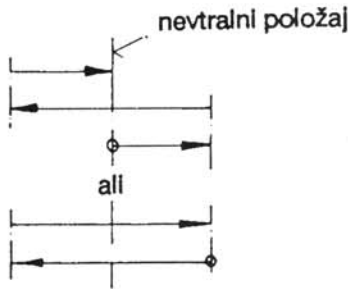
Mehovi lahko prenašajo tudi rotacijska gibanja, s tem pa majhna zvijanja, istočasno izravnavaajoč osne, prečne in upogibne neravnosti.

2.5 Trajnost mehov

Trajnost kovinskega meha je podana s številom gibov do prve netesnosti (leak), pri čemer smatramo gib premik v obe smeri ter vračanje v začetni položaj (sl.3) Če so tlaki in elastične deformacije v mejah dopustnosti, mora vsak meh vzdržati najmanj 10.000 gibov pri "hladni" obremenitvi in pravilni vgradnji. Število gibov do porušitve pa je navadno mnogo večje.



Slika 2. Shematski prikaz membranskega meha



Slika 3. Smeri gibanja meha pri enem gibu

Na trajnost oz. delovno dobo vplivajo: temperatura, amplituda elastičnega odklona, delovni tlak, (mehanska) prednapetost (razporeditev elastičnega gibanja), frekvenca obremenjevanja. Poleg teh pa zmanjšujejo trajnost nedovoljeni dejavniki, katerih učinek ni mogoče izračunati, kot npr. tlačni valovi, toplotni udari, korozija, nestrokovna vgradnja ipd.

Vakuumske črpalke povzročajo tresenje (pulzacije), hitro delujoči ventili pa tlačne sunke. V takih primerih priporočajo proizvajalci sestavljene ali večstenske mehove.

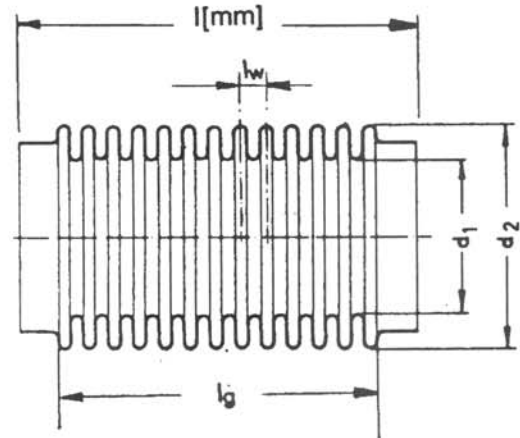
2.6 Preskus kvalitete

Za vsak namen uporabe obstajajo različni preskusi kvalitete mehov. Za vakuumiste je še najbolj pomembna vakuumska tesnost. Enostavna metoda, s katero lahko ugotavljamo netesnosti do 10^{-4} mbarl/s, je z nadtlakom (meh, napolnjen z zrakom do nadtlaka 1 bar, potopimo v vodo in opazujemo morebitno izhajanje mehurčkov), kar je sicer dovolj dobra metoda za elemente, ki jih vgrajujemo v grobovakuumske dele vakuumskega sistema, sicer pa moramo uporabiti helijev detektor netesnosti. Netesnost mora biti manjša od 1×10^{-9} mbarl/s.

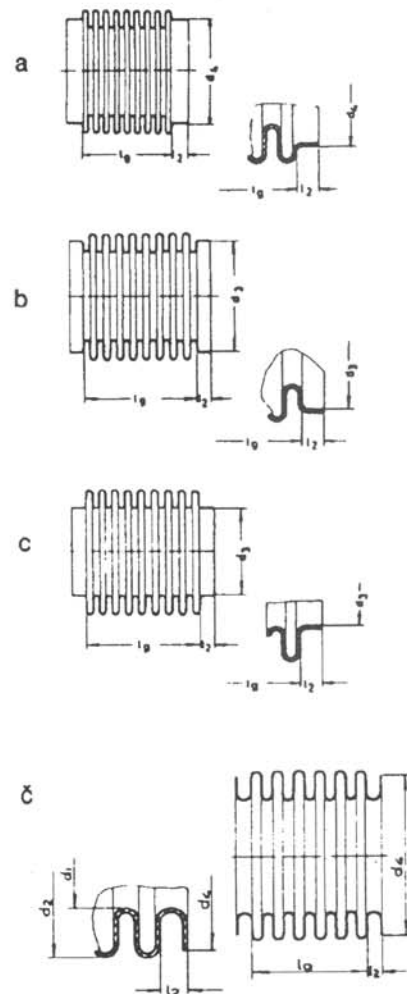
3 Dimenzioniranje mehov

Kovinske mehove izdelujejo le specializirana podjetja, zato je potrebno, da pred naročanjem ugotovimo, kakšne dimenzije in druge lastnosti mora imeti meh, da bo zadovoljil naše zahteve, pri čemer si pomagamo s proizvajalčevim katalogom. Določiti moramo material (npr. nerjavno jeklo z oznako proizvajalca), število sten, zunanji (d_2) ali notranji premer (d_1) v mm (sl.4)*, število reber n_w (dolžina enega rebra, l_w , je razdalja med središči dveh zunanjih zgibov oz. med grebenoma) in dolžina narebričenja l_g [mm], pri čemer je $l_g = n_w l_w$ oz. $n_w = (l_g / l_w)$. Dolžina narebričenja pa še

ni celotna dolžina meha. Upoštevati moramo še dolžino končnikov, katerih oblika pa je tudi pomembna zaradi prigradnje prirobnic. Najbolj običajne so tri vrste standardnih oblik končnikov ter posebna vrsta, primerna za varjenje, ki jih prikazuje sl. 5. Od proizvajalca moramo torej zahtevati primerno obliko končnika, njegovo dolžino l_2 ter zunanji (d_4) oz. notranji premer (d_3). Pomemben podatek pri naročilu je celotna dolžina meha l (mm).



Slika 4. Shema navadnega kovinskega meha



Slika 5. Razne vrste končnikov pri navadnih mehovih

Da bi lahko pravilno pripravili naročilo, moramo poznati vse navedene dimenzije, najprej pa moramo izračunati število reber n_w . Pri osnem gibanju meha lahko uporabimo obrazec:

$$n_w = (\delta_b / \delta_n) , \quad (2)$$

pri čemer je δ_b zahtevana celotna dolžina giba (oz. hoda; v obe smeri glede na nevtralno lego) kompletnega kovinskega meha in δ_n nominalna dolžina osnega giba enega rebra oz. elastična deformacija enega rebra.**

Zgled 1:

Za premikanje predmetov v vakuumskem sistemu potrebujemo dolžino celotnega hoda osnega manipulatorja 50 mm (δ_b). Glede na konstrukcijo smo izbrali notranji premer kovinskega nerjavnega enostenskega meha 27 mm (zunanji premer 41 mm). Iz tabele v Opombi 2 dobimo $\delta_n = 0.54$. Celotni gib enega rebra je torej $2 \times 0.54 = 1.08$ mm; $n_w = (\delta_b / \delta_n) = 50 / 1.08 \approx 46$. Potrebujemo torej meh s 46 rebri, dolžino narebričenja $l_g = n_w \times l_w = 46 \times 3.1 = 142.6$ mm. Vzamemo standardni končnik po sl. 5c z $d_3 = 27$ mm in $l_2 = 8$ mm. Celotna dolžina meha $l = 8 + 142.6 + 8 \approx 162$ mm.

Analogni obrazec lahko uporabimo, če je gibanje upogibno (kotno). Število reber je $n_w = (\alpha_b / \alpha_n)$ oz. $\alpha_g = \alpha_n \times n_w$, pri čemer je α_g dovoljeni, α_b pa zahtevani kot upogiba celotnega meha in α_n dovoljeni kot upogiba enega rebra (v kotnih stopinjah).

Zgled 2:

Iz prejšnjega zgleda ($n_w = 46$; $\alpha_n = \pm 1.5$) lahko izračunamo dovoljeni odklon (upogib) meha v eno smer $\alpha_g = 46 \times 1.5 = 69^\circ$ oz. 138° v celoti.

Če je gibanje prečno, pa je obrazec za izračun števila reber n_w takle:

$$n_w = \sqrt{\frac{\lambda_b}{\lambda_n}} \quad \text{oz.} \quad \lambda_g = \lambda_n \cdot n_w^2 \quad (3)$$

Pri čemer je λ_b zahtevana, λ_g pa dovoljena dolžina prečnega giba meha, λ_n pa normalna dolžina giba enega rebra.

Zgled 3:

Iz prvega zgleda lahko izračunamo prečen gib našega meha:

$$\lambda_g = 0.018 \times 46^2 = \pm 38 \text{ mm} ,$$

to pomeni skupni prečni gib $2 \times 38 \text{ mm} = 76 \text{ mm}$

Pri vakuumskih ventilih uporabljamo kovinske mehove tudi kot vzmetna peresa. Vzmetnost je navadno podana za eno rebro v N/mm za nateg (+) ali stisk

oz. tlak (-). Le-ta pada obratnosorazmerno s številom reber. Osnova sila narašča sorazmerno z dolžino osnega giba:

$$C_{\delta g} = (C_{\delta} / n_w) \text{ [N/mm]} , \quad (4)$$

pri čemer je $C_{\delta g}$ [N/mm] vzmetna sila celotnega meha, C_{δ} pa enega rebra.

Zgled 4:

Vsi podatki iz prejšnjih zgledov; $C_{\delta} = 66 \text{ N/mm}$ (iz tabele)

$$C_{\delta g} = 66 / 46 = 1.43 \text{ N/mm}$$

Če bi torej vzeli meh iz 1. zgleda, ki ima možnost celotnega stiska 25 mm (in prav toliko natega; skupaj 50 mm), bi bila v končni, stisnjeni legi sila na podlago (ustje ventila) $1.43 \times 25 \approx 36 \text{ N}$. In še vprašanje! Ali bi lahko ventil odprli proti atmosferi? Odgovor: Če bi ročico zaprtega ventila premaknili nazaj v nevtralno lego, bi bila vzmetna sila meha enaka nič, vendar bi nanj pritiskala še sila zaradi tlačne razlike (atmosfere-vakuum) z okoli 90 N (Po enačbi 1 je efektivna presečna ploskev meha 9.2 cm^2). Tudi če bi z ročico ventila napeli ventil v nasprotno smer (za 25 mm od nevtralne lege), ventila ne bi mogli odpreti.

Za kombinirano gibanje meha, npr. osno in upogibno (kotno), dobimo celotno število reber enostavno tako, da seštejemo števili reber za osne gibe $n_w \delta$ in upogibne $n_w \alpha$, torej:

$$n_w = n_w \delta + n_w \alpha .$$

Pri prenosu rotacijskega gibanja nastopi v mehu torzijski moment. Dopustni torzijski moment celotnega meha m_{rzB} je obratno sorazmerno s številom reber, torej:

* Opomba 1: Razmerje med notranjim (d_1) in zunanjim premerom (d_2) je 0.6 ali več, optimalno 0.65 [1]

** Opomba 2: Nekaj podatkov za enostenske mehove iz nerjavnega jekla [1]

d_1 (mm)	d_2 (mm)	l_w (mm)	δ_n (mm)	α_n (°)	λ_n (mm)	C_{δ} (N/mm)
8	13	1.4	± 0.15	± 1.3	± 0.006	140
10	17	1.7	± 0.28	± 1.8	± 0.011	50
16	24	2	± 0.33	± 1.6	± 0.011	60
22	34	2.8	± 0.49	± 1.65	± 0.014	84
27	41	3.1	± 0.54	± 1.5	± 0.018	66
33	50	4	± 0.7	± 1.6	± 0.023	38
38	56	4	± 0.74	± 1.5	± 0.023	80
42	60	4.3	± 0.8	± 1.5	± 0.023	90
51.4	71	4.6	± 0.9	± 1.4	± 0.021	160
60	82	5	± 1.1	± 1.5	± 0.024	140

$$m_{\tau z B} = m_{\tau z} \times (1/n_w) \text{ [Nm]}$$

pri čemer je $m_{\tau z}$ dovoljen torzijski moment za eno rebro (tabelirano v /1/).

Zgled 5:

Vsi podatki iz prejšnjih zgledov ($n_w = 46$, $d_1 = 27$ mm, $d_2 = 41$ mm). Iz tabele /1/ dobimo, da je dovoljen torzijski moment za eno rebro $m_{\tau z} = 3.7$ za celotni meh pa le: $m_{\tau z B} = (3.7/46) = 0.08$ Nm, odgovarjajoči kot zasuka pa je: $\alpha = 0.04 \times 46 = 1.84^\circ$, kar velja za enostenski nerjavni ali bronasti meh. Dvostenski meh lahko prenese približno dvakrat večji torzijski moment, tristenski pa trikrat večjega kot enostenski.

4 Sklep

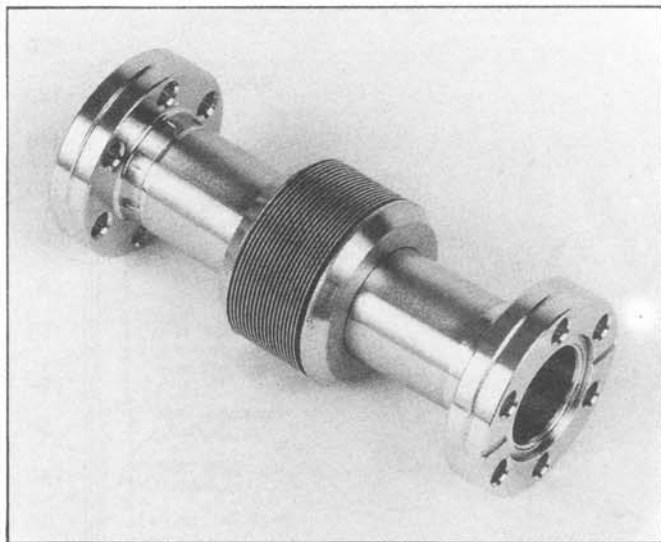
Kovinske mehove lahko s pridom uporabljamo v vakuumski tehniki kot gibljive cevne povezave med posameznimi vakuumskimi elementi, v ventilih in pri

prenosnikih gibanja ter v vakuumski kriotehniki. Gibljivi so v vseh smereh: osno, upogibno, prečno in kombinirano. Za strokovno ravnanje z njimi je potrebno poznavanje lastnosti in način dimenzioniranja in naročanja. Kovinske mehove, ki so različnih vrst (navadni, membranski, miniaturni), moramo opremiti z ustreznimi standardiziranimi prirobnicami. O načinu spajanja mehov s prirobnicami pa morda v drugem članku, kasneje.

5. Literatura

- /1/ Metal bellows, Hydra Handbook no.441 E, Witzenmann GMBH, Pforzheim 1987
- /2/ Servometer, Miniature metal bellows and electroforms, Servometer Co., N.J.

Gibke kovinske cevi z vakuumskimi priključki



S specialnimi postopki varjenja (TIG, mikroplazma, laser) izdelujemo vakuumske posode s pripadajočimi priključki in armaturami. Na standardne mehove iz nerjavnega jekla privarimo prirobnice tipa KF, LF ali CF iz ustreznega materiala. Glede na zahteve lahko prilagodimo dolžino cevi in obliko priključnih kosov. Vsi izdelki so preizkušeni na tesnost s helijevim leak detektorjem.

VISOKOTEMPERATURNE SUPERPREVODNE TANKE PLASTI

A. Cvelbar, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING THIN FILMS

ABSTRACT

A review of the development on a field of high temperature superconductors since their discovery is presented. Potential application forms of superconductors are enumerated. Some advantages and drawbacks of new materials are presented. Major thin film deposition techniques are reviewed and analysed. Potential combination of superconductors, electronics and optonics is shown.

POVZETEK

Podan je pregled dosežkov na področju visokotemperaturnih superprevodnikov od njihovega odkritja dalje. Našteti so možni načini uporabe superprevodnikov. Prikazane so prednosti in slabosti novih materialov. Opisane so glavne tehnike priprave visokotemperaturnih tankih plasti. Predstavljena je potencialna možnost združitve superprevodnikov, elektronike in optonike.

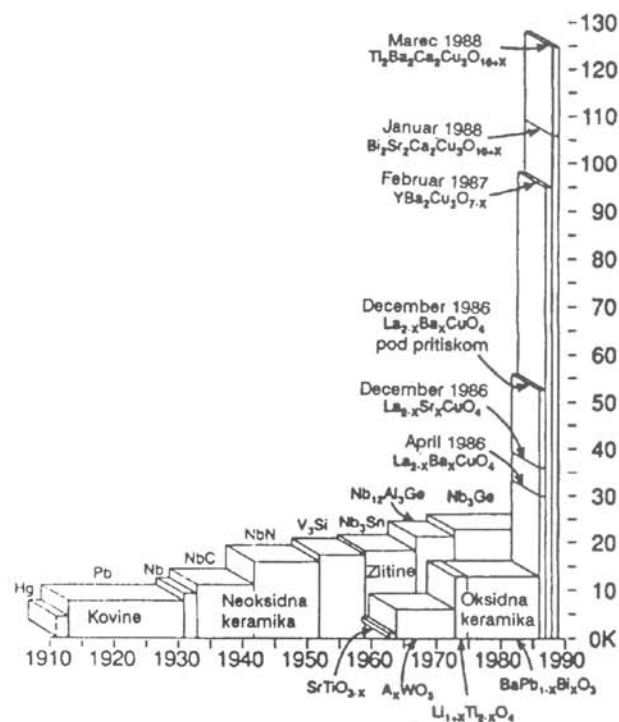
1 UVOD

Superprevodnost, nemerljivo majhno upornost nekaterih snovi pri temperaturah blizu absolutne ničle, je odkril H. K. Onnes leta 1911 med ohlajanjem živega srebra pri temperaturi 4.2 K. To odkritje je vzpodbudilo iskanje snovi, ki so superprevodne pri višjih temperaturah. Raziskovanje kovin, neoksidne keramike ter zlitin je postopno vodilo k vedno višji temperaturi prehoda v superprevodno stanje, t.j. kritični temperaturi $T_c / 10$. Tako je imela do leta 1986 najvišjo znano temperaturo prehoda ($T_c = 23$ K) zlitina Nb_3Ge . Tega leta sta Bednorz in Müller odkrila oksidno keramiko $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ z nepričakovano visoko kritično temperaturo 30 K, kar je povzročilo naglo raziskovanje oksidov. Z zamenjavo lantana z itrijem ($YBa_2Cu_3O_7$) se je le-ta pomaknila kar na 93 K. Sledili sta še odkritji spojin sistemov Bi-Sr-Ca-Cu-O ter Tl-Ba-Ca-Cu-O s kritičnimi temperaturami do 110 K oziroma 125 K. Glede na starejše superprevodnike se ti, novejši, imenujejo visokotemperaturni. Hiter napredek pri iskanju kritičnih temperatur med leti 1986 in 1988 je vzbudil upe, da bomo kmalu poznali superprevodnike pri sobni temperaturi in da bodo naprave s temi elementi kmalu postale vsakdanjost. Najvišja poznana in potrjena temperatura prehoda se od leta 1988 ni znatno spremenila, obenem pa je postalo jasno, da je priprava visokotemperaturnih superprevodnikov v uporabni obliki zelo zahtevna. Optimizem je tako zamenjala zavest, da bo potrebno še veliko truda in časa, preden se bodo visokotemperaturni superprevodniki vključili v naše vsakdanje življenje.

Zaradi nemerljivo majhne upornosti, izrivanja magnetnega polja iz notranjosti superprevodnika, zanimive odvisnosti specifične toplote od temperature, enkratnih pojavov na zelo tankem izolatorju med dvema superprevodnikoma in drugih zanimivih lastnosti, predstavljajo superprevodniki zelo zanimivo skupino

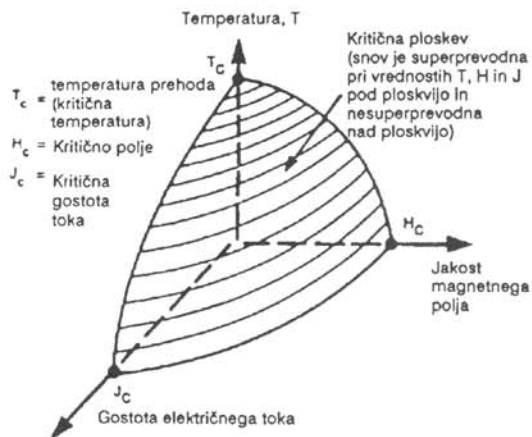
snovi, ki nudi potencialne možnosti uporabe na mnogih področjih, kot so elektronika (spominski elementi, elementi z Josephsonovim stikom, integrirana vezja), pridobivanje in uporaba energije (shranjevanje in prenos energije, motorji in generatorji), industrija (ločevanje in predelava snovi, tipala in pretvorniki, magnetno zaslanjanje, magneti), medicina (diagnostični sistemi magnetne resonančne slike), tehnologija (pospeševalniki delcev, biotehnologija in inženiring), vesoljska tehnika in obramba (vesoljska plovila, elektromagnetna izstrelitev, prenos mikrovalovne moči, zveze, žiroskopi) in transport (magnetno lebdeča vozila, pogon ladij).

Že pred odkritjem visokotemperaturnih superprevodnikov so se superprevodniki uveljavili na nekaterih področjih, kot je na primer ustvarjanje močnih magnetnih polj, kjer je cena električne energije za napajanje bakrenega navitja nekajkrat večja od stroškov za vzdrževanje, napajanje in ohlajanje superprevodnega magneta skupaj. Superprevodni magnet omogoča tudi večjo homogenost polja, ker se baker med delovanjem magneta segreva in se magnetno polje navitja spreminja.



Slika 1. Zgodovinski razvoj najvišje poznane temperature prehoda superprevodnikov od odkritja superprevodnosti do danes. [10]

Visokotemperaturni superprevodniki imajo dve prednosti pred klasičnimi: višjo temperaturo prehoda ter večji kritični tok. Prva pomeni manj stroškov s hlajenjem superprevodnika. Klasične superprevodnike moramo hladiti z dragocenim helijem ($T = 4 \text{ K}$), visokotemperaturne pa s cenenim tekočim dušikom



Slika 2. Odvisnost superprevodnega stanja od temperature, magnetnega polja in gostote električnega toka [9]

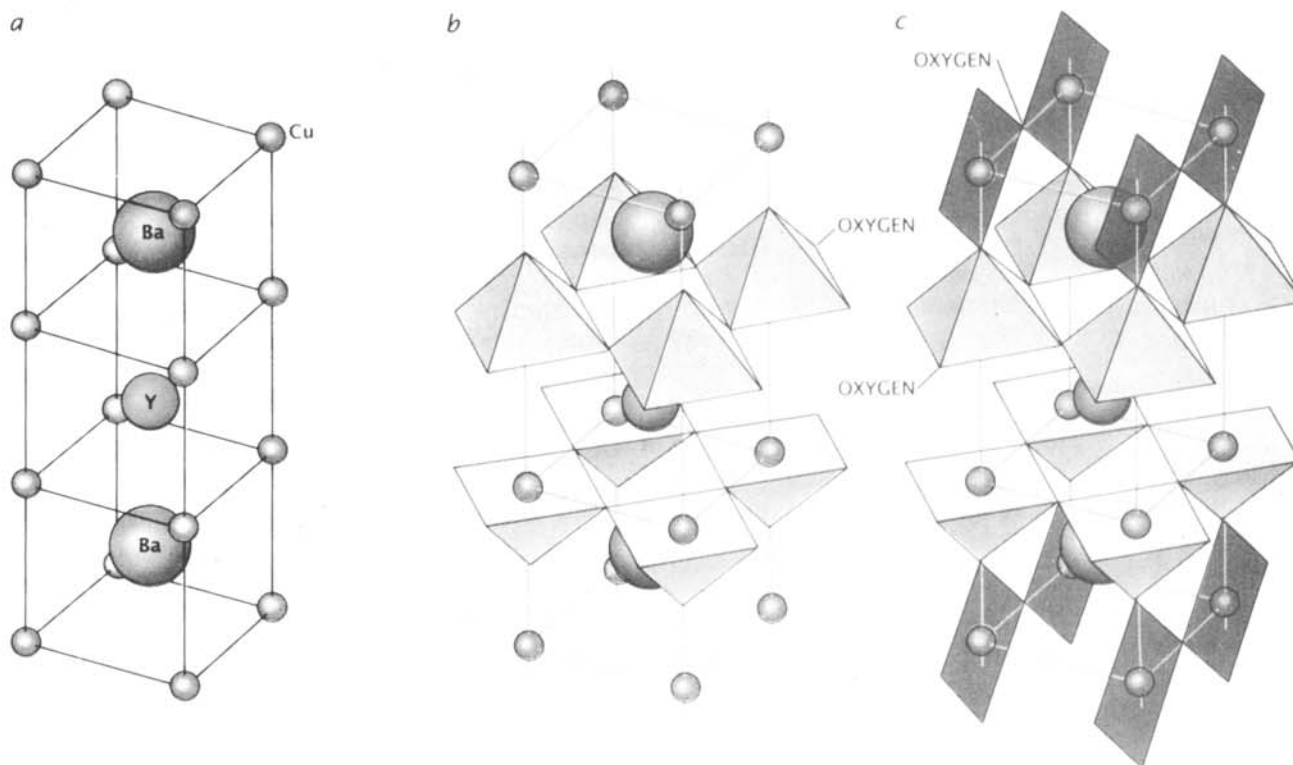
($T = 77 \text{ K}$). Druga prednost je večji kritični tok. To je tisti tok, pri katerem pride do porušitve superprevodnosti. Odvisen je od temperature in je tem večji, čim bolj smo superprevodnik ohladili pod temperaturo prehoda. Ta odvisnost velja za klasične in visokotemperaturne superprevodnike, vendar imajo slednji

pri enaki temperaturi večji kritični tok. Visokotemperaturne superprevodnike lahko torej uporabimo na dva načina: pri temperaturi tekočega dušika ali pa, če potrebujemo večji tok in/ali manjši termični šum, pri temperaturi tekočega helija.

Omenjeni visokotemperaturni superprevodniki imajo nekaj skupnih lastnosti. Vsebujejo barij, baker ter kisik, imajo plastovito strukturo, so električno prevodni vzdolž baker oksidnih ploskev ter imajo močno anizotropne električne lastnosti.

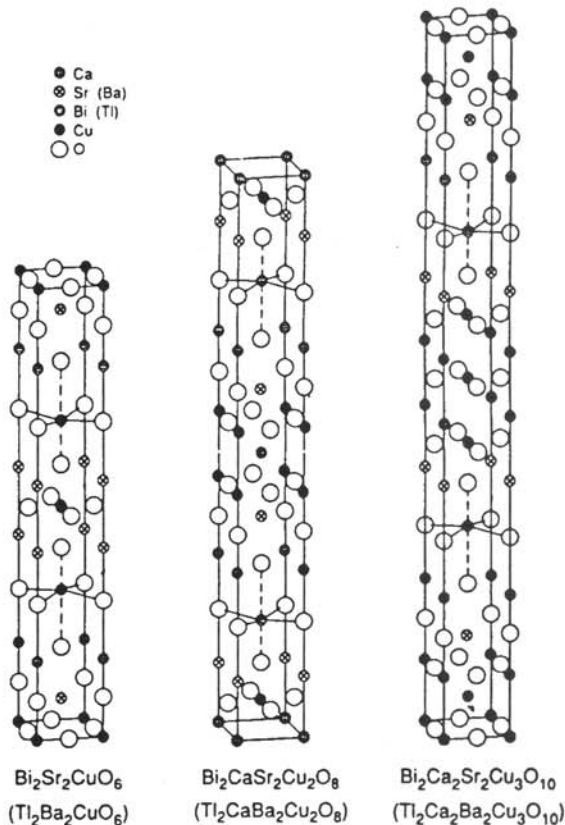
Slabost visokotemperaturnih superprevodnikov v primerjavi s klasičnimi je, da so oksidni. Oksidno keramiko je veliko težje oblikovati v vodnike ter jo upogibati kot zlitine. Zaradi tega se taki vodniki na tržišču še niso uveljavili, poročajo pa o intenzivnih raziskavah in uspehih na raziskovalnem področju. Področje vodnikov je potencialno zelo perspektivno, saj bi kvalitetni visokotemperaturni superprevodni vodniki predstavljali osnovo za mnoge izmed prej omenjenih načinov uporabe in bi tako ustvarili vse prej kot zanemarljivo tržišče.

Pri obravnavi lastnosti se bomo omejili predvsem na $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, ki je doslej najbolj raziskan in najpogosteje uporabljan. Je tudi najbolj preprost sistem glede na število komponent, izotropnost ter preprostost izdelave. Zaenkrat je edino $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ mogoče pripraviti na "in situ" način, v eni sami napravi. Možnost tega načina priprave je za uporabo v elektroniki zelo pomembna, saj omogoča pripravo tako enoplastnih



Slika 3. a) Osnovna celica $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ je sestavljena iz treh kock. Kisikovi atomi so zaradi preglednosti izpuščeni. b) Izolator $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$. c) Superprevodnik $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. [4]

kot večplastnih struktur. Druge superprevodnike moramo izdelovati po "ex situ" metodi v več zaporednih korakih v različnih napravah. Omeniti velja še dejstvo, da ima superprevodnik Bi-Sr-Ca-Cu-O višjo temperaturo prehoda od $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, vendar je



Slika 4: Osnovne celice različnih faz bizmutovih in talijevih superprevodnikov [10].

težko pripraviti eno samo superprevodno fazo tega superprevodnega sistema, saj se poleg faze $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ($T_c = 110$ K) pojavljajo tudi druge, ki imajo nižje kritične temperature. Talijev sistem Tl-Ba-Ca-Cu-O ima še višjo kritično temperaturo, vendar je talij hlapljiv in strupen.

Značilnost visokotemperaturnih superprevodnikov je močna odvisnost lastnosti od koncentracije kisika. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ je izolator, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ pa superprevodnik s $T_c = 93$ K. Če spreminjamo vsebnost kisika, t.j. x v $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ med 0 in 0.6, se temperatura prehoda spreminja med 93 K in 0 K. Če je x večji od 0.6, snov ni superprevodna [3].

Visokotemperaturni superprevodniki so zaenkrat najbolj aktualni v obliki tankih plasti, ker v tej obliki omogočajo večje kritične gostote toka kot v masivni obliki. Za to sta vsaj dva vzroka: usmerjena rast in napake v plasti.

Usmerjena rast je pomembna zato, ker imajo visokotemperaturni superprevodniki anizotropne lastnosti. Kritični tok vzdolž c osi kristalne celice je za

velikostni razred manjši od kričnega toka v smereh a ali b . Če torej želimo imeti velik kritični tok v ravnini podlage, moramo pripraviti usmerjeno plast s c osjo pravokotno na podlago. Če pa želimo izdelati večplastno strukturo, npr. superprevodnik - izolator - superprevodnik (Josephsonov stik), mora biti plast usmerjena s c osjo vzporedno s podlago.

Napake v plasti ovirajo porušitev superprevodnosti zaradi prisotnosti kritičnega toka. Le-ta povzroči močno magnetno polje v okolici superprevodnika. To polje začne prodirati v superprevodnik v obliki vrtincev, ki se s povečevanjem polja krepijo in združujejo. Napake v plasti pripnejo (pinning) vrtince in jim onemogočajo premike in združevanje. Zaradi tega je kritični tok večji kot v snovi brez napak. Seveda pa teh ne sme biti preveč, saj ohromijo mehanizem superprevodnosti. Meje med kristalnimi zrni, ki vsebujejo nečistoče, delujejo kot šibke povezave (weak link) za elektronske pare, ki so nosilci superprevodnosti.

2 PRIPRAVA VISOKOTEMPERATURNIH SUPERPREVODNIH TANKIH PLASTI

Visokotemperaturne tanke plasti je mogoče pripraviti na različne načine, kot so: naprševanje, pulzno lasersko nanašanje (pulsed laser ablation), naparevanje, kemijsko nanašanje iz parne faze (Chemical Vapour Deposition - CVD), termično pršenje (thermal spaying) ter mokre kemijske tehnike.

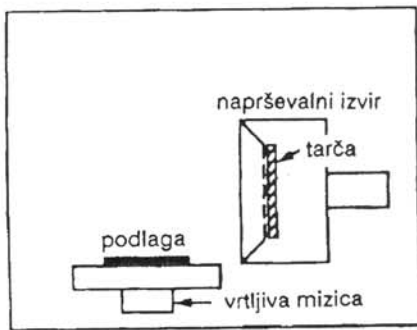
Nanos visokotemperaturnih superprevodnikov zahteva uporabo najbolj zahtevne tankoplastne tehnologije. Zahtevnost te ustreza zapletenosti materialov samih. Visokotemperaturni superprevodniki vsebujejo 4 ali 5 različnih vrst atomov, zato je možnih zelo veliko medsebojnih produktov.

Omenili smo že, da lahko edino $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ nanašamo tudi po "in situ" metodi, ki poteka v eni sami napravi in je dvokoračna metoda. Ostale visokotemperaturne superprevodnike lahko pripravimo samo po "ex situ" metodi, ki poteka v dveh različnih napravah in je trikoračni postopek. Pri "ex situ" metodi v primeru $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ v prvem koraku nanesemo amorfno plast na podlago v eni napravi. Nato v drugi napravi s pregrevanjem na visoki temperaturi ($> 800^\circ\text{C}$) plast najprej kristaliziramo v tetragonalno obliko $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$, nato pa jo oksidiramo v ortorombsko obliko na nižji temperaturi ($400 - 500^\circ\text{C}$) ob prisotnosti kisika. Prvi korak "in situ" procesa predstavlja epitakšen nanos tetragonalne faze na podlago pri visoki temperaturi ($< 650^\circ\text{C}$) in nizkem tlaku kisika (npr. 10 Pa), ki mu v isti napravi sledi pretvorba v ortorombsko fazo, ki jo omogočimo s tem, da na koncu nanosa vpustimo kisik in plast kontrolirano ohladimo.

NAPRŠEVANJE

Naprševanje (magnetronsko, diodno, z ionskim curkom) se zelo pogosto uporablja za pripravo visokotemperaturnih superprevodnikov. Lahko uporabljamo en ali pa več izvirov. Omogoča nam

preprost nadzor nad hitrostjo nanašanja. Naprševanje iz ene same stehiometrične tarče (kovinske YBa_2Cu_3 ali keramične $YBa_2Cu_3O_7$) je najbolj preprost način nanašanja superprevodnika. Največjo hitrost nanašanja bi omogočala kovinska tarča, vendar zlitine z itrijem ni mogoče pripraviti [1]. Zato moramo uporabiti keramično tarčo, ki prinaša nizko hitrost naprševanja, nevarnost pregretja ter težave z uhajanjem kisika iz tarče, ki jo lahko spremeni iz superprevodnika v slab



Slika 5. Shematski prikaz izvenosnega (off axis) naprševanja, ki se izogne nekaterim slabostim geometrije klasičnega naprševalnika. [2]

prevodnik ali celo v izolator. Če sočasno napršujemo iz več kovinskih tarč, nam prisotnost kisika povzroča njihovo oksidacijo, kar lahko zmanjša razpršitveni koeficient posamezne tarče za cel velikostni razred. Zaradi prisotnosti kisika se relativna hitrost nanašanja posameznih komponent spremeni, zato je težko pripraviti kontrolirano sestavo plasti. Prisotnost kisika v naprševalniku močno vpliva na sestavo plasti zaradi obstreljevanja podlag z negativnimi delci, kot so O, O_2 ali BaO, ki izhajajo iz tarče oziroma katode. Te delce pospeši velik padec napetosti v katodnem temnem področju plazme naprševalnika, stran od katode, tako da ti delci obstreljujejo plast in ji s tem spreminjajo sestavo. V plasti, napršeni iz $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ tarče, je zato ponavadi premalo Cu in Ba. Tej slabosti klasičnega sistema se lahko izognemo s povišanim tlakom v naprševalniku ali s posebno lego podlage.

S povišanim tlakom v naprševalniku zmanjšamo prsto pot delcev in jim tako onemogočimo doseganje velikih hitrosti v temnem katodnem področju ter ohranitev njihove energije na poti do podlag.

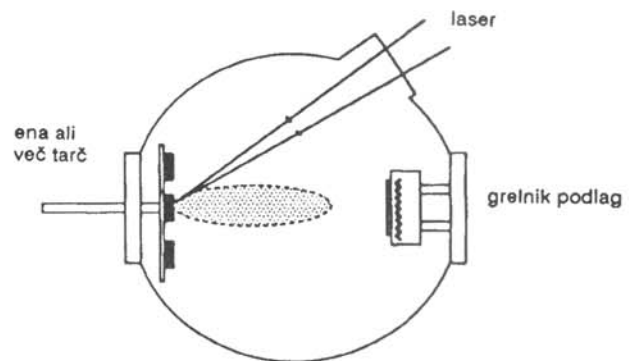
Posebna lega pomeni namestitvev podlag izven plazme, vzporedno z normalo na tarčo, vendar vstran od nje (off axis). Zaradi take postavitve je vpliv obstreljevanja zanemarljiv, prenos razmerij elementov s tarče na plast je dober, slaba stran pa je majhna hitrost naprševanja.

Z naprševanjem superprevodnih tankih plasti se ukvarjamo tudi v Odseku za tanke plasti in površine na Institutu Jožef Stefan v Ljubljani. Plasti $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ nanašamo na nepregrete podlage v napravi s plazemskim curkom Sputron ter jih nato pregrevamo po "ex

situ" metodi. Tako pripravljene plasti imajo temperaturo prehoda 93 K in se jim upornost zmanjša na nemerljivo majhno vrednost pri 80 K /11/.

PULZNO LASERSKO NANAŠANJE

Pulzno lasersko nanašanje (pulsed laser ablation) je novejša tehnika nanosa tankih plasti. Izvir je tarča iz materiala, ki ga želimo nanesti na podlage. Ultravijolični visokoenergijski laserski pulz z gostoto moči med 10^8 in 10^{10} W/cm² ter trajanjem okoli 10 ns izpari material tik pod površino, povzroči odprtje površine, odlet majhnega volumskega dela snovi v prostor ter rast tanke plasti na podlagah. UV svetloba je pogosto uporabljena zaradi velikega absorpcijskega koeficienta visokotemperaturnih superprevodnikov v tem področju [5]. Za razliko od naprševanja in naparevanja je ta metoda pulzna in zato atomi, ioni in masni skupki potujejo z različnimi hitrostmi in pridejo do podlag ob različnih trenutkih. Pulzno lasersko nanašanje omogoča zelo dober prenos razmerij elementov iz tarče na podlago, ki ni občutljiv na delni tlak kisika v posodi. Zato je ta način nanosa eden od kandidatov za bodoča integrirana vezja v mikroelektroniki. Slabosti pulznega laserskega nanašanja sta zelo usmerjena prostorska porazdelitev s podlage odletelih delcev ter obstoj vključkov v plasti [6]. Prvo je mogoče izboljšati z ustreznim vrtenjem oziroma premikanjem podlag, laserja in tarče ter uporabo širokih laserskih snopov in tarč z ukrivljenimi ploskvami. Vključki v plasti so majhni delci s premerom 0.5 do 2 mm, ki priletijo s tarče in povečujejo hrapavost plasti. Njihovo število lahko zmanjšamo z uporabo tarče z veliko gostoto ali dodatnega laserskega žarka, ki je vzporeden s podlagami.



Slika 6. Shematski prikaz pulznega laserskega nanašanja [2].

NAPAREVANJE

Naparevanje je bila prva tehnika, ki je bila uporabljena za nanos superprevodnih plasti. Ker visokotemperaturni superprevodniki ne tvorijo skupne zlitine, je potrebno uporabiti več izvirov. Pogosto se uporabljajo izviri z elektronskimi puškami z neodvisnimi krmiljenji posameznih hitrosti nanašanja. Zaradi potrebnega relativno velikega delnega tlaka kisika se, kljub uvaja-

nju kisika ob podlagah, tlak poveča po celi posodi in ovira delovanje elektronskih pušk. Ena od metod, ki uporabljajo naprevanje, epitaksa z molekularnim curkom (molecular beam epitaxy, MBE), se je doslej izkazala kot ena od najdražjih, najbolj zapletenih in najmanj uspešnih tehnik. Kljub temu se poskusi s to metodo nadaljujejo, saj je z njo mogoče pridobiti novo znanje o mehanizmu rasti in tvorjenju večplastnih struktur.

Poenostavitev pomeni naprevanje kovin (npr. Y, Ba in Cu za $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) iz omsko gretih izvirov, ker se izognemo težavam zaradi visokih delnih tlakov kisika. V zadnjem času se je pojavila tudi metoda, ki uporablja BaF_2 kot enega od izvirov. Ta omogoča pripravo kvalitetnih plasti po "ex situ" postopku.

Iz večih izvirov lahko napreavamo časovno zaporedno ali sočasno. Če napreavamo zaporedno, moramo nato dobljeno strukturo pregreti ali jo obstreljevati s težkimi atomi, kot je Xe (ion mixing), da se elementi enakomerno porazdelijo po celi debelini plasti.

KEMIJSKO NANAŠANJE IZ PARNE FAZE (CVD)

Možen način nanosa superprevodnih plasti debeline nad $1 \mu\text{m}$ je CVD, ki je osnova za tvorjenje spojin v industriji polprevodnikov. Prednosti te metode je več: hitrosti nanašanja so praviloma velike, nanos lahko poteka pri delnih tlakih kisika vse do atmosferskega tlaka, rast plasti je lahko epitaksna ali usmerjena, če so molekule vstopnih komponent dovolj stabilne. Pomembno je tudi, da ta postopek omogoča enakomerno porazdelitev moči po prostoru, zaradi česar lahko nanašamo plast na podlage zahtevnih oblik. Do sedaj je bila največja slabost tega postopka v kakovosti vhodnih komponent, ki je pogosto povzročala nihanja hitrosti nanašanja posameznih elementov.

TERMIČNO PRŠENJE

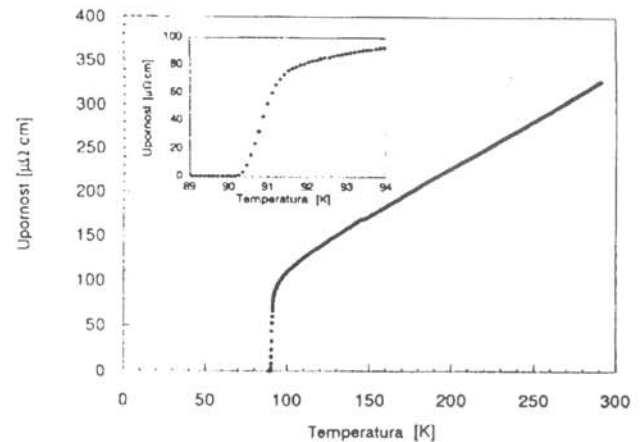
Termično pršenje omogoča praviloma velike hitrosti nanosa ($1 \mu\text{m}/\text{min}$ in več) in je zato zanimivo za neprekinjen nanos na vodnike in trakove. Ne omogoča epitakse, je pa sposobno oblikovati tako strukturo, ki ima relativno visoke kritične tokove.

MOKRE KEMIJSKE TEHNIKE

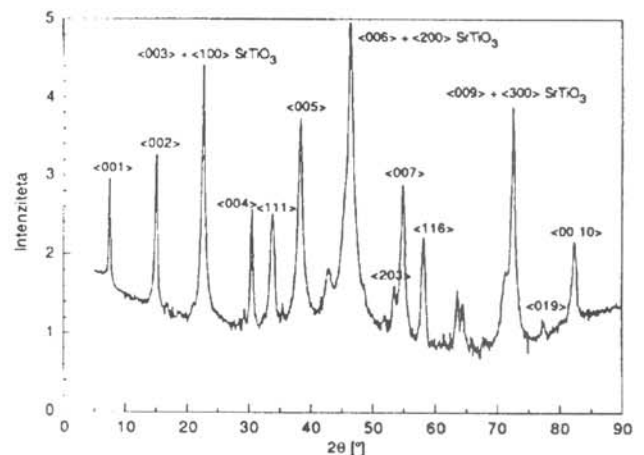
V to skupino spadajo sol-gel tehnike, potapljanje in nanašanje z vrtilnikom ter kemijsko pršenje. Prednost teh tehnik je sposobnost tvorjenja čistih in kemijsko homogenih plasti, obenem pa tudi primernost za nanašanje prevlek na vrtilniku ali s potapljanjem.

Med vsemi metodami dasta po "in situ" načinu priprave najboljše rezultate napreševanje in lasersko pulzno nanašanje. Ti dve tehniki sta doslej omogočili doseganje najvišjih kritičnih gostot toka (do $5 \cdot 10^6 \text{ A}/\text{cm}^2$) ter najhitrejši prehod v superprevodno stanje (v manj kot 1 K). Manj kvalitetne plasti imajo pogosto širok prehod v superprevodno stanje, ki se sicer začne pravočasno (93K za $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$), vendar postane upornost nemerljivo majhna šele pri nižjih temperaturah, npr. 80 K,

60 K ali pa še nižje. Ker je tehnologija priprave superprevodnih tankih plasti še mlada, imajo opisane tehnike še možnost, da se razvijejo in prevladajo.



Slika 7. Temperaturna odvisnost upornosti zelo kvalitetne superprevodne tanke plasti $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ na podlagi SrTiO_3 , pripravljene po "in situ" metodi na temperaturi 670°C . Območje prehoda je posebej predstavljeno še v oknu. [12]



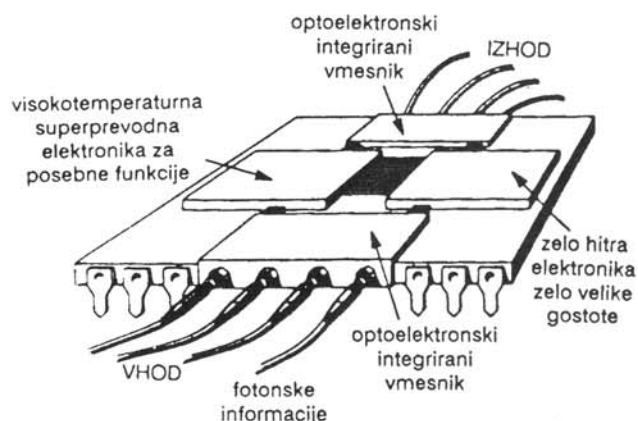
Slika 8. Značilna rentgenska uklonska slika "in situ" napršene epitaksne plasti na podlagi SrTiO_3 [12].

3 UPORABA VISOKOTEMPERATURNIH TANKOPLASTNIH SUPERPREVODNIKOV

Prvi komercialno dostopni izdelek (razen demonstracijskih kompletov lebdjenja ohlajenega superprevodnika nad magnetom) visokotemperaturnih superprevodnikov je bil mikrovalovni resonator tovarne Superconductor Technologies iz ZDA leta 1990 [7]. Sledilo mu je nekaj podobnih izdelkov, napredek raziskovalnih skupin pa napoveduje prve čipe z Josephsonovimi stiki, kar postavlja vprašanje združljivosti tehnologij polprevodnikov in superprevodnikov.

Da bi bila tehnologija superprevodnih tankih plasti združljiva z mikroelektronsko, bi morali znižati temperaturo podlag na 550-600°C ter "in situ" pripraviti plast. Zaenkrat tega ne zmore nobena metoda, raziskovanja pa potekajo v smeri uporabe izvirov vzbujenega kisika. Tega lahko pripravimo na različne načine: z radiofrekvenčnim poljem v bližini podlag, z uvajanjem kisika skozi mikrovalovni resonator, z izvirom ECR (elektronska ciklotronska resonanca) ter z ozonom ali N₂O kot izvirov.

Ovira za združitev superprevodniške in polprevodniške tehnologije je tudi silicij kot skupna podlaga. Superprevodnike praviloma nanašamo na zelo odporne monokristale, kot so na primer SrTiO₃, MgO, ZrO₂, LaAlO₃ ali NdGaO₃. Silicij ima v primerjavi z njimi veliko močnejšo medsebojno difuzijo s superprevodniki. Poleg tega se Si razlikuje od superprevodnikov tudi po koeficientu temperaturnega raztezka ter dimenzijah osnovne celice. Vse te slabosti je mogoče zmanjšati z uporabo ene ali dveh vmesnih plasti med silicijem in superprevodnikom.



Slika 9. Podoba možnega bodočega hibridnega sistema, vključujočega superprevodne, polprevodne ter optične elemente [2].

Dolgoročno je zanimiva tudi trojna povezava superprevodnih, polprevodnih in optičnih elementov. Tak širokopasovni hibridni procesor bi na vhodnem vmesniku pretvarjal fotone v elektrone, signal hitro obdelal v elektronskem vezju izredno velike integracije (VLSI) ter specializiranem superprevodnem vezju (sl. 9). Ta signal bi nato spet pretvoril v fotone in ga poslal naprej. Močno elektron-elektronsko medsebojno vplivanje omogoča elektronski delovanje učinkovitih preklonnih elementov. Šibko foton-fotonsko medsebojno vplivanje pa omogoča v optoniki prenos informacij z majhnim prisluhom na velike razdalje. Superprevodniki kažejo lastnosti elektrone in optonike. Kažejo močno medsebojno vplivanje osnovnih

delcev ter majhno absorpcijo in disperzijo potujočih signalov. Verjetno zaradi svojih omejitev (npr. cena, vzdrževanje) ne bodo nadomestili optonike, lahko pa bi skupaj z njo in elektroniko omogočili širokopasovne sisteme. Visokotemperaturni superprevodniki so kovinski oksidi. Ta skupina pa ima tudi pomembne mikroelektronske in optoelektronske lastnosti, kot so feroelektričnost, optična nelinearnost, veliko optično presojnost in relativno velike lomne količnike. Če kovinske okside dopiramo z ioni prehodnih kovin, se jim zelo spremenijo optične lastnosti. Če npr. dodamo LiNbO₃ titan, dobimo valovod in če dodamo Al₂O₃ krom, dobimo dajalnik svetlobe.

4 SKLEP

Visokotemperaturni superprevodniki so v mnogočem še neraziskani. Še manj vemo o posledicah njihovih dopiranj z različnimi elementi. Zaradi vsega dosedaj znanega in predstavljenega ter glede na to, da spadajo v zanimivo skupino kovinskih oksidov, lahko ugotovimo, da so perspektivni. Kljub temu živi to področje v senci velikih besed ob njihovem odkritju. Danes se zdi ena večjih napak na tem področju ravno to, skoraj neomejeno, obljubljanje. Visokotemperaturna superprevodnost je pač ena od tehnologij, ki se mora dokazati in tako prodreti. V šestih letih od odkritja ji še ni uspelo rešiti dovolj vprašanj, povezanih s tehnologijo novih snovi. Rešiti mora tudi problem razmerja cena/zanesljivost ter ponuditi na trgu zaključene sisteme. Marsikaj ji še manjka, vendar je od odkritja minilo šele šest let. Kakšna je bila elektronika toliko let po odkritju transistorja?

LITERATURA

- /1/ W. Kautek, Vacuum, Vol. 43, 5-7, 1992, 403-411
- /2/ A Ramesh, A. Inam, T. Sands and C. T. Rogers, Mat. Sci. and Eng., B14 (1992), 188-213
- /3/ R. J. Cava, A. W. Hewat, E. A. Hewat, B. Batlogg, M. Marezio, K. M. Rabe, J. J. Krajewski, W. F. Peck and L. W. Rupp jr., Physica C 165 (1990), 419-433
- /4/ R. M. Hazen, Scientific American, June 1988, 52-61
- /5/ H.-U. Habermeier, Mat. Sci. and Eng., B13 (1992), 1-7
- /6/ D. H. A. Blank, R. P. J. Ijsselsteijn, P. G. Out, H. J. H. Kuiper, J. Flokstra and H. Rogalla, Mat. Sci. and Eng., B13 (1992), 67-73
- /7/ Superconductor Industry, Spring 1990, 7, Rodman Pub. Corp.,
- /8/ Superconductor Industry, Spring 1992, 18, Rodman Pub. Corp.,
- /9/ Superconductivity Sourcebook, Ed. by D. Hunt, J. Wiley&Sons, 1989, 12
- /10/ K. Easterling and J. Niska, Sci. Progress, Oxford (1990) 74, 69-90.
- /11/ E. Karič, A. Žabkar, A. Cvelbar, P. Panjan, M. Ambrožič, V. Marinkovič, Dj. Mandrino, I. Poberaj, J. Gasperič and B. Navinšek, YBaCuO superconducting thin films sputtered in a triode system Vuoto, Vol. XX, N^o2, (1990) 389.
- /12/ A. Gauzzi, M.L. Lucia, B.J. Kellet, J.H. James and D. Pavuna, Physica, C182 (1991), 57-61.

OPTIMIRANJE VAKUUMSKE TOPLLOTNE OBDELAVE REZILNIH ORODIJ IZ HITROREZNIH JEKEL

V. Leskovšek¹, B. Ule¹, A. Rodič¹, D. Lazar², M. Pogačnik²

¹Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 61001 Ljubljana, tel.: (061) 151-161

²Plamen Kropa

OPTIMISATION OF VACUUM HEAT TREATMENT OF CUTTING DIES MADE FROM HSS

ABSTRACT

Manufacturing of cutting dies from HSS M2 (AISI), is one of the most important vacuum heat treatment operations with uniform high- pressure gas quenching. The importance of optimal heat treatment, is the possibility of making the optimum combination of the basic characteristics of cutting dies made from HSS for the given of working part/cutting die combination.

Three different austenitization temperatures, and five different tempering temperatures were chosen. Some of the cutting dies were cold treated and coated with TiN by PVD, to produce the correct hardness balance, toughness, cutting properties and wear resistance in the finished tool. The result of the present investigation is important for the optimisation of vacuum heat treatment of different tools made from HSS which are under tensile impact stress during exploitation. For them optimal combination of hardness and fracture toughness are decisive.

POVZETEK

Pri izdelavi orodij iz hitroreznih jekel je ena najpomembnejših operacij vakuumska toplotna obdelava. Pomen pravilne toplotne obdelave je, da lahko vplivamo na izbiro optimalne kombinacije osnovnih karakteristik orodij iz hitroreznih jekel za določeno kombinacijo del/orodje.

Za toplotno obdelavo hitroreznih jekel uporabljamo različne agregate. V zadnjem času vse bolj pogosto uporabljamo vakuumske peči s homogenim ohlajanjem pod visokim tlakom N₂, zaradi reševanja ekoloških problemov ter boljših lastnosti vakuumsko toplotno obdelanih rezilnih orodij, izdelanih iz hitroreznega jekla. Izbrali smo tri različne temperature avstenitizacije in pet različnih temperatur popuščanja. Polovico vseh obrezilnih matic smo podhladili, polovico celokupnega števila matic iz posamezne skupine smo še dodatno površinsko obdelali, in sicer z nanosom TiN plasti po PVD postopku, s tem smo želeli doseči optimalno razmerje med trdoto, žilavostjo, rezilnimi lastnostmi in obrabno obstojnostjo.

Rezultati raziskave so pomembni za optimiranje vakuumske toplotne obdelave različnih orodij, izdelanih iz hitroreznega jekla, ki so med delom pod udarno-natezno obremenitvijo. Za trajnost takšnih orodij je odločilnega pomena pravilna izbira optimalne kombinacije trdote in lomne žilavosti.

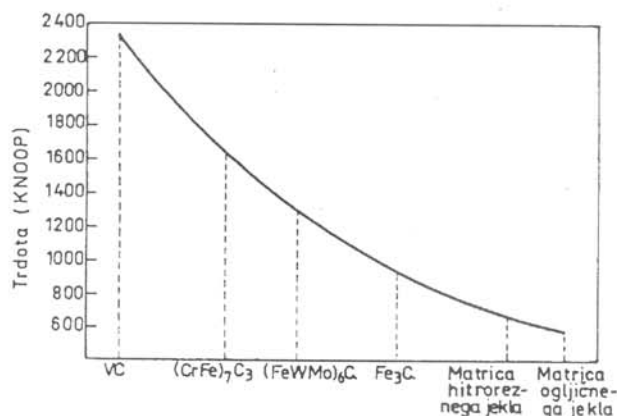
1 UVOD

Pri izdelavi orodij iz hitroreznih jekel je ena najpomembnejših operacij toplotna obdelava. Pomen pravilne toplotne obdelave je, da lahko vplivamo na izbiro optimalne kombinacije osnovnih karakteristik orodij iz hitroreznih jekel za določeno kombinacijo del/orodje, kot so:

- odpornost proti obrabi
- trdnost rezilnega robu
- tlačna meja plastičnosti (kriterij za trdoto)
- žilavost.

Odpornost proti obrabi

V splošnem je odpornost proti obrabi odvisna od trdote, vrste karbidov in razmerja med karbidi in matrico. Odpornost proti obrabi pri hitroreznih jeklih se povečuje sorazmerno s celotno prostornino karbidov in tudi njihovo trdoto. V diagramu na sliki 1 so podane približne vrednosti trdot za nekatere karbide /1/.



Sl. 1. Primerjalne vrednosti trdot karbidov, ki jih najdemo pri orodnih jeklih /1/

Kot je razvidno iz diagrama, ima vanadijev karbid VC trdote od 2200 do 2400 HV, zato je njegov vpliv na odpornost proti obrabi pri hitroreznih jeklih največji.

Poškodbe trenjskih površin, ki jih najdemo na rezilnih orodjih, lahko razvrstimo v štiri osnovne tipe obrabe /2-4/:

- zaradi površinske utrujenosti materiala
- adhezivna
- abrazivna
- korozijska.

Tem tipom obrabe pripadajo sekundarni znaki, kot so:

- jamičavost (pitting)
- kontaktna korozija
- erozija.

Razumljivo je, da odpornost proti obrabi ne moremo označiti kot materialno lastnost, marveč le kot lastnost kompleksnega tribološkega sistema. Kljub temu pa v splošnem velja, da je prevladujoči tip obrabe rezilnih orodij odvisen od vrste materiala orodja, predvsem od njegovih fizikalnih (mehanskih, toplotnih) in kemijskih lastnosti pri povišani temperaturi.

Podhlajevanje

Številni avtorji /1, 5-8/ so dokazali, da podhlajevanje, ki sledi kaljenju, transformira zaostali avstenit. V praksi pa priporočajo za visoko legirana jekla, med katera spadajo tudi hitroreznata, enourno podhlajevanje po kaljenju, in sicer med prvim in drugim popuščanjem v trdnem ogljikovem dioksidu ali tekočem dušiku pri temperaturah med -75°C in -196°C . Podhlajevanje omogoča, da jeklo doseže M_f temperaturo, pri kateri se transformira zaostali avstenit /9/, kar povečuje efekt sekundarnega utrjevanja, s tem pa doseganje maksimalne trdote in odpornosti proti obrabi ter maksimalno dimenzijsko stabilnost orodja.

Trdnost rezilnega robu

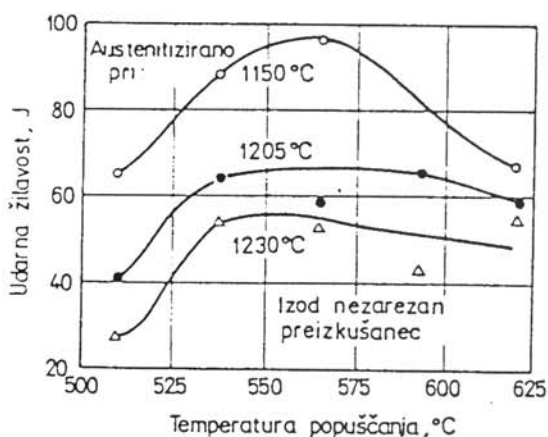
Pri rezilnih orodjih je pomembna lastnost trdnost rezilnega robu, ki predstavlja odpornost materiala proti zaokroževanju ali deformaciji rezilnih robov. Največjo ostrino rezilnega robu in s tem podaljšano uporabnost rezilnega orodja iz hitroreznega jekla zagotavljajo drobni in enakomerno razporejeni karbidi v osnovni matrici. Segregacije in veliki karbidi pa imajo negativen vpliv na stabilnost rezilnih robov.

Tlačna meja plastičnosti $R_{e(0,2)}$

Kriterij, ki odloča o izbiri trdote rezilnega orodja iz hitroreznega jekla, je tlačna meja plastičnosti $R_{e0,2}$. Če je ta prenizka, obstaja nevarnost plastične deformacije rezilnih orodij.

Žilavost

Lomi, makro- in mikrookruški so vzrok propadanja rezilnih robov. Sposobnost jekla, da se upira tem pojavom, pa je poznana kot njegova žilavost. Le-ta je omejena z napakami v jeklu (razporeditev karbidov v trakove, vključki žindre itd.). Pri obremenitvah se lahko pojavijo okoli napak koncentracije napetosti, ki so tako velike, da pride do loma orodja, razen v primeru, ko se koncentracije napetosti lahko sprostijo pri lokalnem plastičnem toku na mikropodročju. Lastnosti osnovne matrice (žilavost, trdota), ki je podvržena plastičnemu toku, lahko s toplotno obdelavo spreminjamo znotraj širokega območja, ki je omejeno z napakami v materialu.



Sl. 2a. Vpliv temperature avstenitizacije in popuščenja na udarno žilavost jekla /10/

Diagrama na slikah 2a in 2b nazorno prikazujeta vpliv temperature avstenitizacije in temperature popuščenja na udarno žilavost in trdoto za hitroreznata jekla Č.7680 /10/.

To pomeni, da varnost orodij, izdelanih iz jekel z visokimi trdnostmi ter relativno nizkimi žilavostmi, ne more biti določena le s klasičnim trdnostnim izračunom.

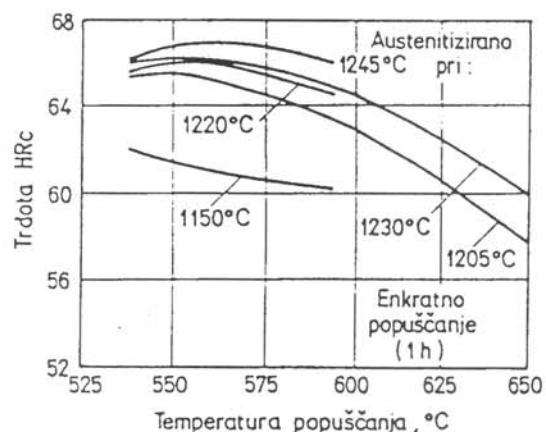
Zato je nujno potrebno kvantificirati žilavost jekla še bolj natančno in ne zgolj empirično, kot je to pri klasičnem Charpyjevemu preizkusu, kjer je mogoča le določitev krhke oz. žilave narave loma, in še to le za omejeno področje debelin.

V ta namen so bili razviti različni koncepti mehanike loma /11, 12/. V takoimenovani linearni elastomehaniki loma, kjer je obnašanje vse do loma povsem elastično, je merilo za porušitev faktor kritične intenzitete napetosti K_{Ic} , ki ga imenujemo tudi lomna žilavost materiala. Lomna mehanika torej povezuje napetosti v materialu z velikostjo napak ter lomno žilavostjo materiala, zato prav merjenje lomne žilavosti postaja tako zelo pomembno za rezilna orodja, izdelana iz hitroreznih jekel.

Postopki rutinskega določevanja lomne žilavosti so že vrsto let standardizirani /11, 12/. Navadno uporabljamo standardne CT preizkušance (Compact Tension).

Preizkušanelec z utrujenostno razpoko v korenu zareze (maksimalni faktor intenzitete napetosti v fazi utrujanja ne sme preseči 60% veljavne lomne žilavosti jekla) "statično" obremenjujemo in pri tem uporabljamo odvisnost med obremenitvijo ter odpiranjem ustja razpoke CT preizkušanca /11, 12/.

Pogosto pa se zgodi, da debeline rezilnih orodij bodisi niso zadostne, da bi iz njih izdelali veljavne CT preizkušance, bodisi ni na voljo ustreznih naprav za merjenje lomne žilavosti, ali pa potrebujemo le okvirne vrednosti za K_{Ic} za prve grobe ocene dopustnih napak na rezilnih orodjih. V vseh takšnih primerih si lahko pomagamo z različnimi korelacijskimi formulami za računanje lomne žilavosti jekel /11, 12/.

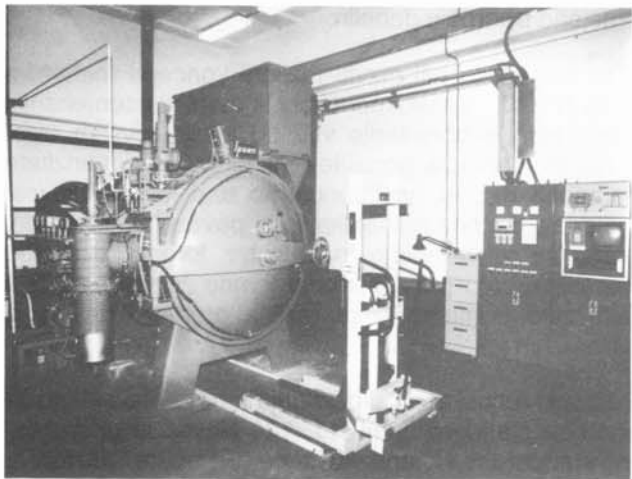


Sl. 2b. Vpliv temperature avstenitizacije in pogojev popuščenja na trdoto jekla Č.7680 /10/

2 EKSPERIMENTALNI DEL Z REZULTATI

Za toplotno obdelavo hitroreznih jekel uporabljamo različne agregate. V zadnjem času vse pogosteje uporabljamo vakuumske peči s homogenim hlajenjem pod visokim tlakom (slika 3), predvsem zaradi reševanja ekoloških problemov. Poleg tega dosegamo tudi boljše lastnosti vakuumsko toplotno obdelanih rezilnih orodij, kot so:

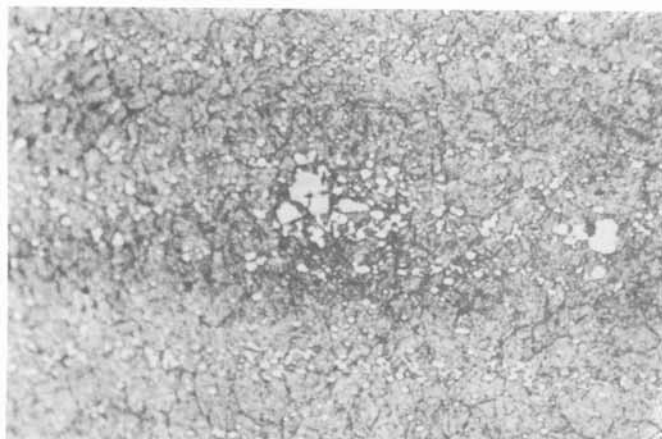
- visoka kakovost površine
- minimalne dimenzijske spremembe
- čista, neoksidirana in nerazogljivena površina.



Sl. 3. Visokotemperaturna vakuumska peč s homogenim hlajenjem in visokim tlakom, proizvajalec IPSEN, tip VTC 324-R

Pri našem eksperimentalnem delu smo se omejili na študij optimiranja toplotne obdelave 88 obrezilnih matric, izdelanih iz jekla VEW S 600 (Č. 7680) - slika 4.

Osem skupin obrezilnih matric, cilindričnih nateznih preizkušancev z zarezo po obodu in matricam podobnih etalonov, izdelanih iz iste palice, smo toplotno ob-



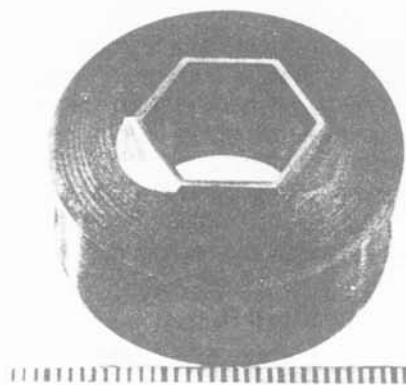
500x

nital

Sl. 5. Struktura: Karbidi in popuščeni martenzit z velikostjo zrna 16 SG, T_A 1150°C

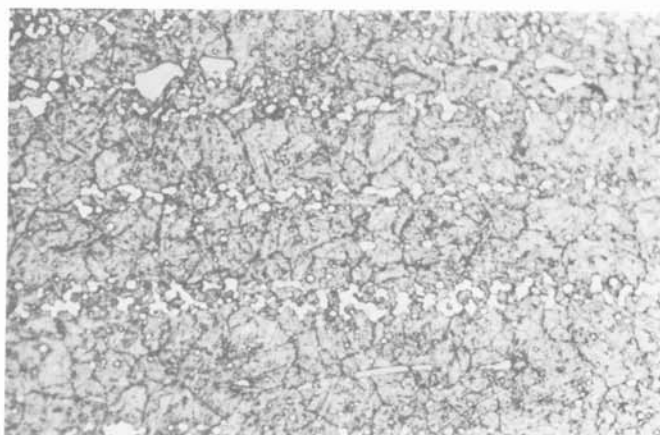
delali v vakuumski peči IPSEN VTC 324-R (tabela 1) tako, da so se vse obrezilne matrice, cilindrični natezni preizkušanci in etaloni uvrstili v tri razrede trdot, in sicer v 61 \pm 1, 64 \pm 1 in 66 \pm 1 HRC. Polovico tako toplotno obdelanih matric smo med obema popuščanjema še 1 uro podhlajevali v propanolu pri -95°C.

Ena polovica celokupnega števila matric iz vsake posamezne skupine pa je bila še dodatno površinsko obdelana, in sicer z nanosom 2 nm debele plasti TiN po PVD tehnologiji.



Sl. 4. Obrezilna matrica

Matricam podobne etalone smo metalografsko pregledali in ugotovili, da imajo vsi vzorci, kaljeni s temperature avstenitizacije 1150°C, velikost avstenitnega zrna 16-17 po SG (Snyder-Graff) - slika 5. Zrna so dokaj homogena. Na vzorcih, kaljenih s temperature avstenitizacije 1230°C, smo namerili velikost zrna 11-12 SG - slika 6. Velikost in razporeditev karbidov je bila pri



500x

nital

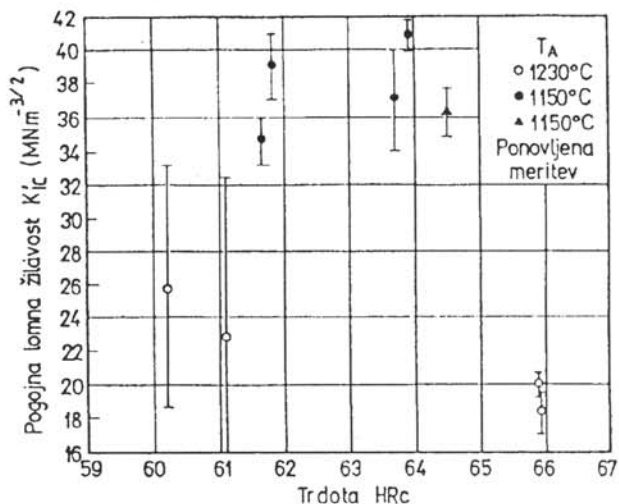
Sl. 6. Struktura: Karbidi in popuščeni martenzit z velikostjo zrna 12 SG, T_A 1230°C

vseh vzorcih enaka, saj so bili vzeti iz ene in iste metalurške taline in vroče plastično preoblikovani na isto dimenzijo. Karbidi so bili v vzdolžni smeri razporejeni v trakove, velikost karbidnih zrn pa je bila od 1 do 20 nm.

S strukturno rentgensko analizo smo določili odstotek zaostalega avstenita, katerega delež je bil na vseh vzorcih pod 1 vol. %. Določili pa smo tudi tetragonalnost martenzita in našli opazno tetragonalnost ($>1 \times 10^{-3}$) le pri vzorcih, ki so bili med obema popuščanjema podhlajeni v propanolu, 1 uro pri -95°C (tabela 1).

Rezultati mehanskih preizkusov kažejo, da se izmerjene trdote na obrezilnih maticah in cilindričnih preizkušancih z zarezo po obodu za določevanje lomne žilavosti dobro ujemajo (tabela 1). Lomno žilavost K_{IC} smo skušali določiti z nateznim preizkusom cilindričnih preizkušancev z zarezo po obodu. Ker je pri tako visokih trdotah cilindrični preizkušavec močno zarezno občutljiv, nam tokrat s pulziranjem ni uspelo ustvariti utrujenostne razpoke v korenu zareze /11,12/. Rezultati merjenja lomne žilavosti - lahko jo imenujemo pogojna lomna žilavost K'_{IC} - so zbrani v tabeli 1.

Ugotovimo lahko, da podhlajevanje obrezilnih matic med obema popuščanjema le malo vpliva na pogojno lomno žilavost hitroreznega jekla, saj jo poslabša le za približno 10% (tabela 1). Veliko bolj kot podhlajevanje pa na pogojno lomno žilavost tovrstnega jekla vpliva temperatura avstenitizacije - slika 7.



Sl. 7. Odvisnost med trdoto obrezilnih matic ter pogojno lomno žilavostjo K'_{IC} . Temp. avstenitizacije je navedena kot parameter.

Visoka temperatura avstenitizacije namreč pomeni večja avstenitna zrna ter zato poslabšano pogojno lomno žilavost jekla, četudi so s primerno izbiro temperatur popuščanja sicer dosežene sorazmerno nizke trdote.

Težave, ki smo jih imeli pri ustvarjanju utrujenostne razpoke v korenu zareze, zahtevajo, da bo v bodoče bolj smiselno določevanje lomne žilavosti po metodi, ki jo za hitroreznega jekla in karbidne trdine uporablja H.F. Fishmeister /12/. Lomna žilavost K_{IC} namreč postaja pomembna materialna lastnost, ki v linearni elastomehaniki povezuje napetosti v materialu z velikostjo različnih napak, ki so v materialu vedno prisotne.

Vse obrezilne matrice smo preskusili na obrabo na najboljši možni način, tj. neposredno na stroju Boltmaker 5/6"-5-52 pri obrezovanju glav vijakov M8 iz jekla ČSN 12122.

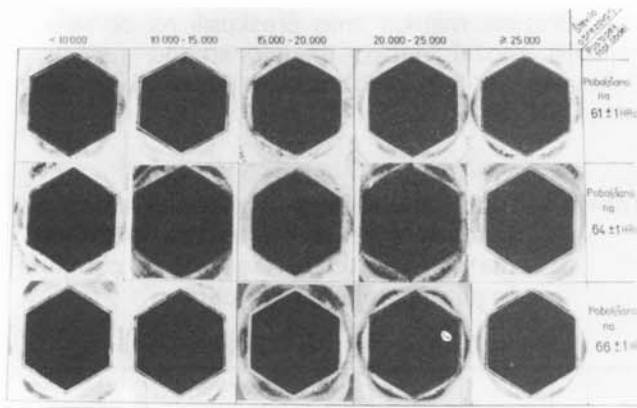
Tabela 1. Toplotna obdelava, mehanske lastnosti in tetragonalnost martenzita obrezilnih matic (podatki se nanašajo na oslojene in na neoslojene matrice).

Skupina matic	Temp. avstenitizacije ($^{\circ}\text{C}$)	Trdota matic HRc (x)	Trdota nateznih preizkušancev (x) HRc	Pogojna lomna žilavost K'_{IC} ($\text{MNm}^{-3/2}$)	Tetragonalnost $\text{tx}10^{-3}$	Opombe
01	1150	60,8-63,3		39 ± 2	< 1	2 matrice uničeni
	2x565 $^{\circ}\text{C}$	(61,8)	(61,7)			
02	1150	60,7-63		$34,6 \pm 1,4$	1,9	propanol -95°C
	2x565 $^{\circ}\text{C}$	(61,7)	(62)			1h; 2 matrice
03	1150	62,7-64,7		$40,9 \pm 0,9$	< 1	
	2x530 $^{\circ}\text{C}$	(63,9)	(64)			
04	1150	63-64,5		37 ± 4	2,5	propanol -95°C
	2x530 $^{\circ}\text{C}$	(63,7)	(63,8)			1h
05	1230	59,3-61		$25,8 \pm 7,6$	< 1	3 matrice uničene
	2x590 $^{\circ}\text{C}$	(60,2)	(60,7)			
06	1230	60,7-61,7		$22,9 \pm 9,5$	1,2	propanol -95°C
	2x590 $^{\circ}\text{C}$	(61,1)	(60,8)			1h
07	1230	65,3-66,8		$20 \pm 0,2$	< 1	1 matrica uničena
	2x540 $^{\circ}\text{C}$	(65,9)	(65,6)			
08	1230	65-66,5		$18,3 \pm 1,1$	2,3	propanol -95°C
	2x540 $^{\circ}\text{C}$	(65,9)	(65,7)			1h

Rezultate naših opazovanj obrabe rezilnih robov smo zbrali na sestavnih slikah, iz katerih je razvidna smer obrabe rezilnih robov. Iz slike 8 je razvidno, da je trajnost toplotno obdelanih matic brez TiN prevleke med 15 in 20.000 obrezi, odvisno od razreda trdote. Na sliki 9 pa so prikazane matrice, oplemenitene z nanosom TiN.

Ugotovimo lahko, da je trajnost tovrstnih matric - če jo ocenimo na metodološko enak način kot v prejšnjem primeru - med 50 in 60.000 obrezi in celo več.

Vpliv podhlajevanja na obrabno obstojnost rezilnih robov obrezilnih matric smo ugotavljali na 96 primerkih, ki so bili toplotno obdelani, kot je podano v tabeli 2.

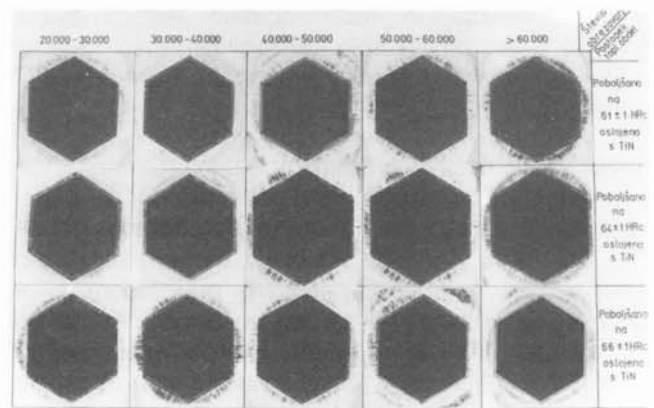


Sl. 8. Posnetki obrezilnih robov poboljšanih matric (pov. 4,3 x)

Parametri preizkušanja matric (sila rezanja, število udarcev, to je obrezovanj v enoti časa, temperatura, način mazanja itd.) so bili ves čas nespremenjeni, tako da na končni rezultat niso vplivali.

Razlike, ki smo jih ugotovili med posameznimi matricami oziroma njihovimi skupinami, lahko izvirajo le od matric samih. Po končanem preizkušanju, ki smo ga zastavili tako, da naj bi vsaka od obrezilnih matric opravila 20.000 obrezovanj, smo pregledali pod binokularjem robove tistih, ki so dejansko zdržale predpisano število obrezovanj in na njih ocenili število poškodovanih robov (tabela 2).

Rezultati preizkušanja obrezilnih matric na stroju Boltmaker 5/16"-5-S2 potrjujejo ugotovitev, da trajnost obrezilnih matric določa predvsem njihova trdota (64-66 HRC), medtem ko lomna žilavost jekla nanjo nima velikega vpliva. Iz tabele 2 je razvidno, da je 74% vseh matric opravilo predvidenih 20.000 obrezovanj, pri drugih pa je prišlo do zloma ali večje poškodbe rezilnih robov



Sl. 9. Posnetki obrezilnih robov, poboljšanih in s TiN oslojenih matric (pov. 4,3x)

zaradi napak pri dodajanju žice ali odvzemanju vijakov.

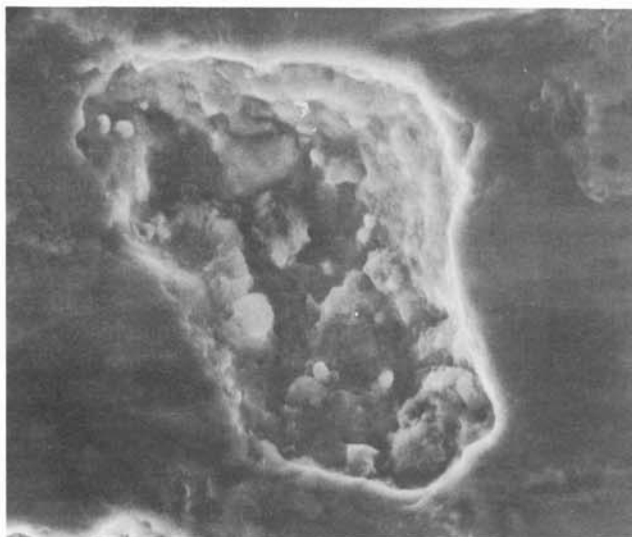
Z ocenjevanjem števila poškodovanih rezilnih robov pod binokularjem smo skušali empirično oceniti vpliv podhlajevanja na njihovo obrabno obstojnost. Kot je razvidno iz tabele 2, imamo v povprečju manjše število poškodovanih rezilnih robov na obrezilnih matricah z 20.000 obrezi, ki so bile podhlajene, v primerjavi z nepodhlajenimi. Prav tako smo ugotovili, da so poškodbe rezilnih robov manj izrazite pri obrezilnih matricah, ki so bile podhlajene, v primerjavi z nepodhlajenimi.

Tabela 2. Rezultati preizkušanja obrezilnih matric na stroju Boltmaker 5/16"-5-S2

Skupina obrezilnih matric	Toplotna obdelava	Trdota rezil. robu HV 10 x	Trdota obrez. matric HRC x	Trdota žice ČSN 12122 HB x	Število obrezilnih matric v eksploataciji	Povprečno število obrezovanj na matrico	Število obrezilnih matric, ki so zdržale 20.000 obrezovanj	Povprečno št. poškodovanih rezilnih robov na matrico (20.000 obrezovanj)
01	1170°C 2x540°C	875	64,5	186	24	17461	17	3,4
02	1170°C 540°C/-95°C/540°C	879	64,5	196	24	18796	17	2,4
03	1230°C 560°C/570°C	936	65,4	193	24	17413	17	3,4
04	1230°C 560°C/-95°C/570°C	917	65,7	190	24	19705	20	2

Obrezilne matrice propadajo v eksploataciji progresivno s časom.

Na osnovi metalografske preiskave rezilnih robov lahko začetek mehanizma obrabe rezilnih robov s TiN oslojenih obrezilnih matric pripišemo površinskemu utrujanju materiala in kasnejši abrazijski obrabi - slika 10. Začetni mehanizem obrabe rezilnih robov na teh matricah pa ni tako jasno razviden, saj zasledimo tako znake površinskega utrujanja materiala, adhezijske obrabe kot tudi abrazijo - slika 11.



Sl. 10. Mikrorelief rezilnega robu obrezilne matrice, oslojene s TiN

Odpornost proti obrabi rezilnih orodij ne moremo definirati kot materialno lastnost, marveč kot lastnost kompleksnega tribološkega sistema. Kljub temu pa v splošnem velja, da je dominanten tip obrabe rezilnih orodij odvisen od vrste materiala orodja, predvsem od njegovih fizikalnih (mehanskih, toplotnih) in kemijskih lastnosti. Zato bo mehanizem obrabe obrezilnih matric ter natančnejša študija soodvisnosti med trdoto, lomno žilavostjo hitroreznega jekla ter morebitnim vplivom povečane tetragonalnosti martenzita vsebina prihodnje raziskave.



Sl. 11. Mikrorelief rezilnega robu obrezilne matrice brez nanosa TiN

3 SKLEP

Na osnovi rezultatov, dobljenih z neposrednim preizkusom obrabe rezilnih robov obrezilnih matric, lahko sklenemo, da oslojevanje s TiN podaljša trajnost obrezilnih matric za 3-krat.

Ugotovili smo, da trajnost le-teh - neodvisno od tega, ali so bile oslojene s TiN ali ne - določa predvsem njihova trdota (64- 66 HRc), medtem ko pogojna lomna žilavost jekla na trajnost obrezilnih matric nima velikega vpliva.

Pomembno je poudariti, da ima lahko hitrorezno jeklo pri enaki trdoti tudi povsem različno pogojno lomno žilavost (tudi za faktor 2,5), kar je odvisno predvsem od temperature avstenitizacije, tj. od velikosti avstenitnih zrn - slika 7.

Podhlajevanje obrezilnih matric med obema popuščanjema ni bistveno vplivalo na trdoto jekla, na lomno žilavost jekla (10%) ter odstotek zaostalega avstenita (vol. %) v hitroreznem jeklu. Zaznaven pa je vpliv podhlajevanja na odpornost proti obrabi in s tem na trajnost podhlajenih obrezilnih matric v primerjavi z nepodhlajenimi. Zdi se, da je manjše število poškodovanih rezilnih robov in s tem večja trajnost podhlajenih matric v neki soodvisnosti z ugotovljeno povečano tetragonalnostjo martenzita.

4 LITERATURA

- /1/ R. Wilson: Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels, Mc Graw-Hill Book Company, UK
- /2/ A. Jonan: Aspect des surfaces frottantes suivant les modes de degradation et d'usure, Traitement Thermique 208-87, 87-96
- /3/ G.Colin: Les mecanismes de l'usure et du fraitement, Traitement Thermique 208-87, 79-86
- /4/ H. Czichos: Tribology, Elsevier scientific publishisne companie, Amsterdam, 1978
- /5/ G.Murry: Pourquoi et comment traiter les aciers par le froid? Rappels metallurgiques, Traitement Thermique 132-79
- /6/ J.C. Rouault: Matierils de mise en oeuvre de l'azote liquide pour les traitements par le froid, Traitement Thermique 132-79
- /7/ R. Mercier: Temoignage de l'utilisation du froid dans un atelier de traitement, Traitement Thermique 132-79
- /8/ J. Berthon: Traitement par le froid des aciers rapides influence sur les qualites de coupe, Traitement Thermique 132-79
- /9/ R.L. Banerjee: Evolution de l'austenite residuelle au cours du revenu, Traitement Thermique 147-80
- /10/ Heat Treating, Metals Handbook, Ninth Edition, 4, 1981, 561-613
- /11/ B. Ule, D. Kmetič, A. Rodič: Merjenje lomne žilavosti jekel s preizkušanci malih dimenzij, Rudarsko-metalurški zbornik 1989, 3, 509-519
- /12/ H.F. Fischmeister: Toughness in High Speed Steels and Hard Metals, Specialty steels and Hard Materials, Materials Development 1982, 127

VARJENJE VAKUUMSKIH KOMPONENT IZ NERJAVNEGA JEKLA

Marjan Drab, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 61111 Ljubljana

WELDING OF STAINLESS STEEL VACUUM COMPONENTS

ABSTRACT

The paper shows experiences in welding of stainless steel for application in vacuum technique, at IEVT. The purpose of the article is to present practical aspects of welding stainless steel vacuum systems and components. The paper gives instructions for construction of the joint, cleanliness, materials and leak detection of the welded joint.

POVZETEK

V prispevku so podane izkušnje s področja varjenja nerjavnega jekla za uporabo v vakuumski tehniki na IEVT. Namen ni teoretično obdelovati posamezno področje, temveč prikazati praktični pogled na varjenje vakuumskih sistemov in komponent. V prispevku je obdelana priprava zvara, čistoča, materiali in testiranje zvarnega spoja.

1 UVOD

Vakuumski spoji so ena izmed osnovnih komponent pri izdelavi vakuumskih sistemov, komponent in sklopov. Pomemben del so varjeni vakuumski spoji. V tem zapisu se bomo omejili na varjenje nerjavnega jekla, naštetih pa bodo tudi nekateri primeri varjenja drugih vakuumskih materialov. Namen tega zapisa je predstaviti varjenje na IEVT in določene izkušnje, ki smo jih pridobili.

2 IZBOR VARILNEGA POSTOPKA

Za uspešno obvladovanje celotnega spektra potreb zahtevnega spajanja vakuumskih elementov je potrebno uporabiti več različnih varilnih postopkov. Na IEVT uporabljamo naslednje postopke:

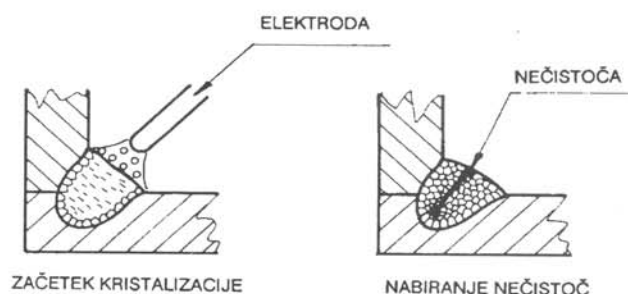
- Varjenje večjih debelin (nad 0.5 mm) po postopku TIG
- Varjenje srednjih debelin (0.2-0.7 mm) z mikroplazemskim varjenjem
- Varjenje malih debelin (pod 0.3 mm) z laserskim varjenjem

Kot je razvidno, gre pri vseh treh za pretaljevanje in manj za varjenje z dodatnim materialom. Vzrok za tak izbor je v tem, da je varjenje s pretaljevanjem bolj kontrolirano in da je manj različnih komponent v zvaru. Hkrati z dodatnim materialom lahko pride do vnosa nečistoč in neželenih vključkov v zvar.

3 KARAKTERISTIKE VARA

Pri varjenju se zaradi visokih temperatur osnovni material tali in meša v var. Oksidacijo taline preprečujemo z zaščitnim plinom.

Var se pri ohlajanju obnaša kot kovina pri litju. Najprej se ohlaja material ob prehodni coni, nato pa notranjost vara (slika 1). Snovi, ki imajo nižje tališče, se ohladi kasneje. To so ponavadi različne nečistoče ali legirni elementi. Zaradi tega potujejo pri strjevanju vara snovi z nižjim tališčem proti centru vara, kjer se nazadnje ohladi. Različne snovi imajo tudi različne temperaturne raztezke. Pri večji koncentraciji nečistoč v centru vara pride zaradi razlik v raztezkih do pokaanja.

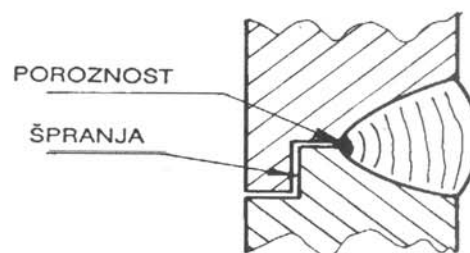


Slika 1. Ohlajevanje taline pri varjenju: a - začetek kristalizacije, b - konec kristalizacije

4 OBLIKOVANJE IN PRIPRAVA ZVARNEGA SPOJA

Od priprave zvarnega spoja je v veliki meri odvisna uspešnost in ponovljivost varjenja. V vakuumski tehniki je potrebno poleg izvedljivosti upoštevati tudi primernost za uporabo v vakuumu.

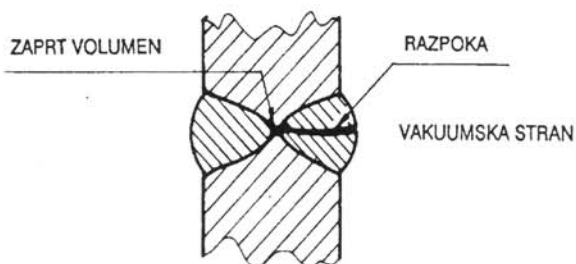
Osnovni napotek varilcu vakuumskih komponent: naj vari z vakuumske strani. S tem se izognemo poroznim in ozkim špranjam v vakuumskem prostoru (slika 2). Ozke špranje so nevarne zaradi ostankov nečistoč, poroznost pa podaljšuje črpanje plinov zaradi oteženega izhajanja le-teh iz por. Ozke špranje



Slika 2. Pojav poroznosti in ozkih rež pri varjenju

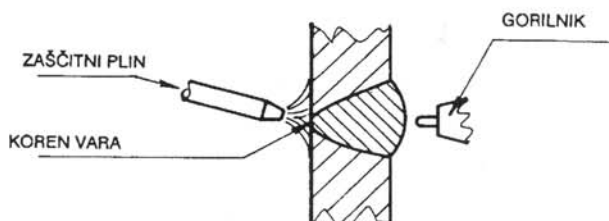
nastanejo zaradi neprilagojenih nasedov ali nepopolne prevaritve po celotni debelini varjenca. Poroznost na korenu vara pa nastane zaradi onemogočenega ščitjenja z zaščitnimi plini. Tudi v primeru, ko uporabljamo plin za ščitjenje korena, ostane v ozki špranji med varjencema dovolj kisika, ki oksidira nezaščiteno talino in tvori porozno tvorbo na korenu vara.

Varjenju z vakuumske strani se moramo v nekaterih primerih odpovedati. Pri izdelavi neke komponente je namreč potrebno vnaprej predvideti, ali bo mogoče po končanem varjenju celotnega sklopa vsak var popravljati z iste strani, kot je bil varjen. Pri varjenju prototipov in unikatov prihaja zaradi neutečene tehnologije do puščanja in s tem tudi do popraviljanja zvarov. Če pride do puščanja na varu, ki smo ga varili z vakuumske strani, ga potem s ponovnim varjenjem na drugi (nevakuumski) strani zgolj zatesnimo. Pri tem pa ne pretalimo razpoke, ki ostane med vakuumskim prostorom in obema varoma (slika 3). V tem prostoru ostane zrak, ki ga črpamo skozi razpoko v varu, kar znatno podaljša čas črpanja in bistveno poslabša karakteristike celega sistema. Zaradi onemogočene detekcije puščanja tega mesta tudi ne moremo odkriti.



Slika 3. Razmere, ki nastopajo pri popraviljanju notranjega zvara z zunanje strani.

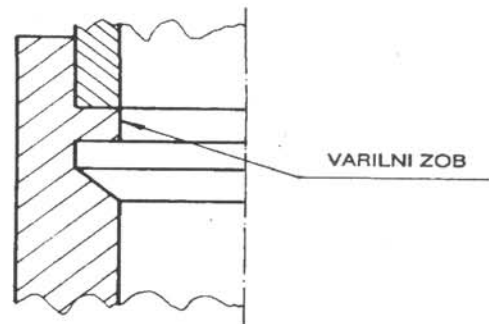
Varjenje z vakuumske strani je mogoče opustiti tudi v primeru, ko tehnologija varjenja zagotavlja zanesljivo prevaritev celotne debeline varjenca ob ustreznem ščitjenju korena (slika 4). Pri tem je potrebno omeniti, da lahko z neprevidno namestitvijo plinskih šob na koren potegnemo tudi kisik iz okolice. Navadno je vakuumska stran znotraj cevi ali komore. Zaradi nedostopnosti je predvsem pri serijskih izdelkih ugodneje variti z zunanje strani.



Slika 4. Zaščita korena pri varjenju

Varjenci različnih debelin imajo različne kapacitete in zato različno odvajanje toplote. Za zanesljivo varjenje poskušamo ta problem premostiti z uporabo varilnih zob (slika 5) ali z različnimi hladilnimi orodji. Varilni zob nam lokalno stanjša debelino varjenca in tako izenači odvajanje toplote iz vara. Istemu namenu

služijo hladilna orodja, ki jih pripnemo na varjenec. Uporaba enega ali drugega sistema je odvisna tako od oblike varjencev kot tudi tehnoloških možnosti izvajalca.



Slika 5. Varilni zob

Zaradi krčenja taline prihaja do velikih termičnih napetosti v zvaru. Te se prenesejo na oba dela varjenca, kar lahko povzroči velike in neprijetne deformacije. Že pri samem konstruiranju je potrebno upoštevati vse te vplive. S pravilno pozicijo vara je mogoče te deformacije bistveno zmanjšati ali odpraviti.

5 ČISTOČA

Vnos neželenih snovi v var preprečimo z ustrezno čistočo spojev. Tu bi omenil nekaj izkušenj, ki smo jih dobili v dosedanji praksi.

- Varjence pred varjenjem temeljito razmastimo in očistimo oksidov. Najnevarnejše so razne masti in hladilna sredstva, ki jih uporabljamo pri odrezovanju. Spojev ne smemo prijemat z golimi prsti, še posebej ne z mastnimi. Prav tako kot nečistoče so pri varjenju nezaželeni tudi ostanki vate, papirja in tekstila. Zaradi visokih temperatur pri varjenju se začno ostanki vode na površini uparjati in oksidirajo talino.
- Oksidi na osnovnem materialu so neželeni tako pri varjenju kot tudi pri vakuumiranju. Oksidi so v osnovi porozne tvorbe, ki zadržujejo atome in zaradi tega podaljšujejo črpanje. V oksidnih plasteh se zelo radi zadržujejo ostanki nečistoč. Njihovo odstranjevanje je zelo oteženo in nezanesljivo. Podobno kot oksidne plasti se obnašajo tudi porozni ulitki, globoke slepe luknje, reže, razpoke itd. Pri tem je potrebno omeniti tudi, da segrevanje nečistoč ne moti zgolj varjenja. Njihovo strjevanje in kristalizacija nam povzročata preglavice tako na površini varjenca kot tudi v kaki slepi navojni luknji.
- Oksidacija osnovnega materiala poteka tudi med varjenjem. To preprečimo s pravilnim oblikovanjem zvarnega spoja ali z ustreznimi hladilnimi orodji.
- Čistoča zaščitnega plina je odvisna od dovoljene oksidacije temena in korena vara. V večini primerov se zadovoljimo z nekaj močnejšo oksidacijo na račun manjše porabe zaščitnega plina in njegove slabše kvalitete. Za neoksidiran var se je potrebno posebej potruditi (čistoča zaščitnega plina, elektrode, gorilnika in dodatnega materiala, varjenje v zaščitnih komorah, uporaba aktivnih zaščitnih plinov).

6 MATERIAL IN OBLIKA ELEKTRODE

Pri varjenju po postopku TIG imajo elektrode zelo velik vpliv na obliko in kvaliteto zvara. Elektrode so iz čistega ali toriranega volframa. Glede oblike velja, da je var globlji in ožji, če je konica elektrode ostrejša. Pri topi konici prihaja do širšega vara in večjih nestabilnosti obloka.

7 PRESKUŠANJE TESNOSTI ZVARA

Varjeni spoj je potrebno pred uporabo v vakuumskih sistemih preizkusiti na tesnost. Tu gre lahko za statično ali dinamično testiranje. Glede na zahtevano tesnost zvara se odločimo za ustrezen postopek odkrivanja netesnosti. Glede obdelave je potrebno povedati, da se v principu vari vakuumskih komponent ne obdelujejo z odrezilnimi postopki (struženje, rezkanje idr.). Najustreznejša postopka za obdelavo sta pri vakuumski tehniki elektropoliranje in peskanje s steklenimi kroglicami. Pri njih ne pride do večjega odvzema materiala ali povzročanja mikrorazpok. V primeru, da je odrezovanje potrebno, moramo po obdelavi spoj ponovno preskusiti na vakuumsko tesnost.

8 SPAJANJE VARJENCEV IZ RAZLIČNIH MATERIALOV

Ponavadi spajamo varjence iz enakega materiala. Pri varjenjih iz različnih materialov pa je potrebno paziti na določene zahteve in omejitve. Upoštevati moramo varivost posameznega materiala, njegove termične

raztezke, trdnost, obnašanje med varjenjem, termično prevodnost itd. Seveda pa spoj dveh različnih materialov ne more preseči trdnosti najslabšega od obeh. V primeru spoja nerjavnega jekla z bakrom je trdnost zvara kvečjemu enaka trdnosti prežarjenega bakra. Varjenje namreč lokalno pregreje oba varjenca in medtem potekajo tudi vsi spremljajoči metalurški pojavi.

9 SKLEP

Varjenje je v vakuumski tehniki nesporno pomembna tehnologija. Vsak spoj je potrebno pazljivo proučiti in obdelati. Seveda pa je tehnologija varjenja zelo odvisna od velikosti serije in zahtevanih karakteristik. Tolerance v spoju morajo biti optimalne. Za zanesljiv spoj je potrebna strokovnost konstruktorja kot tudi varilca.

10 LITERATURA

- /1/ N. W. Robinson: The Physical Principles of Ultra-High Vacuum Systems and Equipment; Chapman & Hall LTD, London, 1968
- /2/ A. Roth: Vacuum Sealing Techniques; Pergamont Press, London, 1966
- /3/ S. E. Linert: Welding Metalurgy, Volume 1; AWS, New York, 1965
- /4/ A. C. Davies: The science and practice of welding; Cambridge University Press, London, 1977
- /5/ N. G. Wilson, L. G. Beawis: Handbook of vacuum leak detection; AVS, New York, 1976

ŽIVLJENJE IN TEHNIKA

Revija **Življenje in tehnika** (ŽIT) je edini slovenski poljubnoznanstveni mesečnik, ki neprekinjeno izhaja že 43 let. Tiskan je na 80 straneh formata B5 in je bogato ilustriran. Izdaja ga Tehniška založba Slovenije, d.d.

Na začetku izhajanja je kot glasilo organizacije Ljudske tehnike seznanjal svoje člane o tehnoloških dosežkih doma in po svetu. Takrat so prevladovali članki o elektrifikaciji in energetiki, obdelovalnih strojih, telekomunikacijah, letalstvu in težki industriji; nekatera od teh področij se v reviji še vedno ponavljajo, hkrati z razvojem novih tehnologij pa so v njej našla mesto še mnoga druga. Uredništvo revije ŽIT skuša kar najbolj držati korak z razvojem ter posredovati nove dosežke na razumljiv način čim širšemu krogu bralcev.

Eno izmed področij, ki imajo v reviji stalno mesto, je kemija. Prispevki na to temo so zelo različni (Atom praznuje petdesetletnico, Kemijsko orožje, Neptunij - prvi transuran, Posipanje prometnih objektov s sredstvi proti zmrzali, Superkondenzatorji, škodljive kemij-

ske substance, Buckyball, Nastanek molekul, Polivinil na zatožni klopi, ...) in se dotikajo številnih drugih področij. Naš namen je tudi v prihodnje obdržati kemijsko tehnologijo kot eno nosilnih rubrik v reviji.

Kdor torej želi poleg zgoraj omenjenih prispevkov prebrati še kaj drugega - tudi s področij, kot so avtomobilizem, arheologija, ekologija, medicina, računalništvo in informatika, satelitska, avdio- in videotehnika... - naj vzame v roke revijo Življenje in tehnika.

Nanjo se lahko naročite pri
Tehniški založbi Slovenije, d.d.,
Lepi pot 6,
61111 Ljubljana,
 telefon 061/213-733.

Naročniki prejema revijo z 20% popustom in imajo ob poravnani naročnini, ki je za zadnje četrtletje 1992 504 SIT, še 20 % popusta ter možnost obročnega odplačevanja pri nakupu strokovnih knjig in priročnikov Tehniške založbe Slovenije, d.d..

NASVETI

Vakuumsko izrazje

Pri lektoriranju tekstov za naše glasilo pa tudi pri drugih strokovnih spisih je opaziti, da pišoči niso preveč kritični pri izbiri pravih (pa tudi pravilnih) besed ali izrazov. Zato smo se to pot odločili, da v NASVETIH objavimo zbirko izrazov, ki jih je privzela terminološka komisija že leta 1985 ob pripravi knjige Vakuumske tanke plasti, ki je v zelo okrnjeni obliki izšla leta 1990 v spomin na pokojnega dr.E.Kanskyja. Tudi novi slovenski pravopis ni preveč spreminjajoče posegel na vakuumsko področje, zato lahko trdimo, da je slovarček nekaterih vakuumskih in nevakuumskih izrazov kar pravi in se ga bomo pri naši reviji trdno držali. Pri slovenskih izrazih, urejenih po abecedi, bomo navedli tudi angleške, tu pa tam še nepravilno obliko.

Bralce prosimo, da nam pomagajo razširiti ta "slovarček" z novimi in lepimi slovenskimi besedami. Na koncu smo dodali nekaj "izzivov", da bi preskusili vašo iznajdljivost in znanje. Nagrad sicer nismo razpisali, ampak vaše predloge bomo objavili.

Slovenski izraz	Angleški izraz	NEPRAVILNO (* : ne priporočamo)
● bliskovno naparevanje	flash evaporation	fleš naparevanje
● čistota (= čistost), čistoča/nečistota, nečistoča; Npr.: Čistota kovine 99,99%; nasprotno od čistoče pa je nečistoča ali umazanija		
● čiščenje s plazmo	glow discharge cleaning	"glimanje"
● določanje značilnosti (lastnosti)	characterization	
● doravnavanje (uporov)	trimming	trimanje
● elektronski curek	electron beam	elektronski snop
● elektronska puška, top	electron gun	
● enoatomska (enomolekulska) plast	monolayer	
● enoslojna plast (v optiki)		
● enota mbar oz. Pa (paskal)	mbar, Pa	pascal, Pascal
Pozor! Vse enote pišemo z malo začetnico in tako, kot jih izgovorimo. Zgledi: amper (A), volt (V), bekerel (Bq), grej (Gy), herc (Hz), džul (J), kilovatúra ali kilovat-ura (kWh), njuten (N), om (Ω), luks (lx), simens (S), sivert (Sv), paskal (Pa), vat (W), veber (Wb) itd.		
● fazna premena	phase change	
● gostota plasti (mg/mm^3)	film density	
● grelnik	boiler	grelec
● ion	ion	jon
● ionsko nanašanje	ion plating	plati(ni)ranje
● ionsko getrska črpalka ionsko-getrska črpalka	ion getter pump	ionskogeterska, ionsko-geterska
● izkoristek, dobít	yield	izplen
● izvír, vir (ionski, elektronski, naparevanja)	source	izvor
● kermetna plast	cermet film	cermetna plast, film
● kondenzirati se (snov se kondenzira, se zgosti)	condense	snov kondenzira
● masívna kovina (snov, material)	bulk metal (material)	kosovni material (snov, kovina ipd.)
● medsebojno vplívanje (delovanje)	interaction	interakcija

Slovenski izraz	Angleški izraz	NEPRAVILNO (* : ne priporočamo)
● medsebojna odvisnost (zveza), soodvisnost	correlation	*korelacija
● merilo		*kriterij
● nanašanje, nanos, nanosena plast	deposition, deposited film	nanešen
● napaka	defect	
● naparevalnik, naprševalnik	evaporation plant, deposition unit, coating plant, sputtering equipment	napraševalnik
● naprševanje (na podlago) kovin, zlitin (Pozor! Pri naprševanju se katoda razpršuje)	sputtering, sputter deposition	napraševanje, "sputranje"
● nastajanje klic	nucleation	*nukleacija
● neprepusten za zrak, neprodušen		zrakotesen
● neslišen	silent, inaudible	brezslišen
● obdobje, stopnja	stadium, stage	
● odporen proti (npr. koroziji), odpornost proti		odporen na
● odprtina	aperture	*apertura
● onesnaženje, onesnažitvena plast, plast nečistoč	contamination	*kontaminacija
● Piranijev merilnik, Pirani-Penningov vakuummeter	Pirani-Penning gauge	pirani merilnik, Pirani-Penning vakuummeter
● plast	film	film
● plastna upornost $R_p(\Omega)$	sheet resistance	$R(\Omega/\square)$
● plastna masa (g/cm^2)	surface density	
● podlaga	substrate	*substrat
● posnemati	simulate	simulirati
● posoda (vakuumška), komora, recipient	recipient	*kotel, *zvon, *poveznik
● potekati, teči, razvijati se (proces, reakcija)		odvijati se
● prepusten, prepustnost, neprepustnost		produšen, produšnost, neprodušnost, propustnost
● prepust		propust
● presevna elektronska mikroskopija	transmission electron microscopy	prosevna
● presevni elektronski mikroskop	transmission electron microscope	
● presojna plast	transparent film	*prosojna plast, film
● prevleka, prekritje	coating	
● prevodnica (tokovna, napetostna)	feed through	prevod, provod, provodnik
● razmere, okoliščine, okolnosti, možnosti, prilike, danosti, položaj, stanje	conditions	pogoji
● razmik, (časovni) presledek		razmak
● ravnati, delati s čim		rokovati s čim
● razprševanje (katode, tarče)	sputtering	
● selitev	migration	*migracija
● sklep	conclusion	zaključek
● skupek, gruča, zrastek	aggregate, cluster	klaster
● sorpcija, sorbirati (ad-, ab-)	sorption	sorbpcija, adsorbpcija, ab-
● specifična upornost, $\rho(\Omega m)$	resistivity	

Slovenski izraz	Angleški izraz	NEPRAVILNO (* : ne priporočamo)
● sproščanje, sprostitvev	relaxation	*relaksacija
● superprevodnost, superprevodne plasti	superconductivity, superconducting films	supraprevodnost
● stresalnik	vibrator	
● tanka plast, tankoplasten, vakuumske tanke plasti, tanka večplastna struktura	thin film	tenka plast, film
● temperaturni koeficient upornosti (TKU)	temperature coeff. of resistance (TCR)	TCR, TKR
● tesnilka, tesnilo (oljno, zračno tesnilo - nem. simmerring)	seal, O-ring	"dihtunga", semering
● tesnjenje	tightness, sealing	tesnenje, "dihtanje"
● težnja, namera, nagnjenje, stremljenje	tendency	
● tlak (= specifična sila pritiska), delni tlak, skupni tlak	pressure (partial, total)	pritisk
● tlak preostalih plinov	pressure of residual gases	rezidualni rezidualni ipd. *rezidualni
● tehtnica na kremenov kristal	quartz balance	kremenova tehtnica, kvarčna vaga
● toplotna stabilizacija	thermal stabilisation	temperaturna stabilizacija
● toplotno staranje	thermal annealing	
● trajnost, uporabnost, obstojnost (npr.: izdelkov)		življenjska doba
● usmerjenost	orientation	*orientacija
● vakuumski sistem (= vak. črpalna naprava + vak. posoda + aparati (merilniki))	vacuum system (= vac. pumping unit + recipient + gauges)	
● vakuum	vacuum	vakum
● vakuumski merilnik (vakuummeter)	vacuum gauge	vakuumski merilec (je človek, ki meri!)
● vpojnost	absorptivity	*absorptivnost
● vrstični mikroskop	scanning microscope	
● tunnelski vrstični mikroskop	tunneling scanning microscope	
● zgled	example	primer (angl. case = primer) (Pozor! Angleži lepo razlikujejo med zgledom in primerom, mi pa to pogosto zmešamo)
● zlitje, zlivanje	coalescence	*koalescenca
● zlog, zlaganje	packing	pakiranje

Za "domačo nalogo" pa tole: Kako bi najlepše prevedli naslednje angleške izraze: gas ballast, by-pass, baffle, butterfly valve, booster pump, leak, molecular drag pump, nude gauge, peak, in situ, ex situ, atomic force scanning tunneling microscopy, cross sectional transmission electron microscopy? Za vse to sicer uporabljamo neke slovenske izraze, ki pa po našem mnenju niso najboljše.

Dr. Jože Gasperič
Institut Jožef Stefan,
Jamova 39, 61111 Ljubljana

DRUŠTVENE NOVICE

IZOBRAŽEVALNI TEČAJI - jesen 1992

Vse uporabnike vakuumske tehnike obveščamo, da sta za letošnjo jesen planirana naslednja dva strokovno izobraževalna tečaja:

VZDRŽEVANJE VAKUUMSKIH NAPRAV 20. in 21. oktobra 1992

Na njem bo obravnavana predvsem tematika, ki jo srečujemo v tehniki grobega in srednjega vakuuma, to je: delovanje, vzdrževanje in popravila rotacijskih črpalk, pregled in uporaba različnih črpalk, ventilov in drugih elementov, meritve vakuuma, hermetičnost in odkrivanje netesnosti v vakuumskih sistemih, materiali za popravila, tehnike čiščenja in spajanja, skupno 16 ur, od tega tretjina praktičnih prikazov in vaj. Cena tečaja je 14.000 SIT (280 DEM). Vsak tečajnik prejme tudi brošuro: "Vzdrževanje vakuumskih naprav" in izkaz o opravljenem tečaju.

OSNOVE VAKUUMSKE TEHNIKE 3., 4. in 5. novembra 1992

Ta tečaj je popolnejši od prvega, obravnava podrobneje vsa prej omenjena področja, poleg tega pa še: pomen in razvoj vakuumske tehnike, fizikalne osnove,

črpalke za visoki vakuum, tankoplastne in druge vakuumske tehnologije, čiste postopke, analize površin ter doziranje, čiščenje in preiskave plinov - skupno z vajami in ogledom Inštituta 20 ur. Namenjen je tako vzdrževalcem in projektantom vakuumskih naprav kot tudi raziskovalcem, ki pri svojem razvojnem ali študijskem delu potrebujejo vakuumske pogoje. Cena tečaja je 12.500 SIT (250 DEM). Udeleženci prejmejo zbornik predavanj: "Osnove vakuumske tehnike" in dokument o opravljenem tečaju.

Oba tečaja se pričneta v **torek ob 8.00 uri** v knjižnici Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, Ljubljana. Prosimo interesente, da se informativno javijo čimprej, za dokončno potrdilo pa velja kopija položnice o plačilu - najkasneje nekaj dni pred pričetkom tečaja na naslov:

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 61111 Ljubljana (številka ŽR: 50101-678-52240). Prijave sprejema organizacijski odbor (Koller, Spruk, Drab, Nemanič), ki daje tudi vse dodatne informacije (tel. 061 263-461).

DRUŠTVO ZA VAKUUMSKO TEHNIKO SLOVENIJE SLOVENIAN SOCIETY FOR VACUUM TECHNIQUE

61000 Ljubljana, Teslova 30, Tel 061 263-461, Fax 061 263-098

PRISTOPNA IZJAVA

Podpisani: izjavljam, da želim postati član / članica
DRUŠTVA ZA VAKUUMSKO TEHNIKO SLOVENIJE in da bom deloval v skladu s pravili društva.

Datum: Podpis:

PODATKI

1. Priimek in ime 2. Rojstni podatki

3. Poklic in izobrazba

4. Zaposlitev: Tel.: naslov:

5. Stanovanje: Tel.: naslov:

6. Naslov prejemanja obvestil

7. Področje zanimanja

8. Pripombe

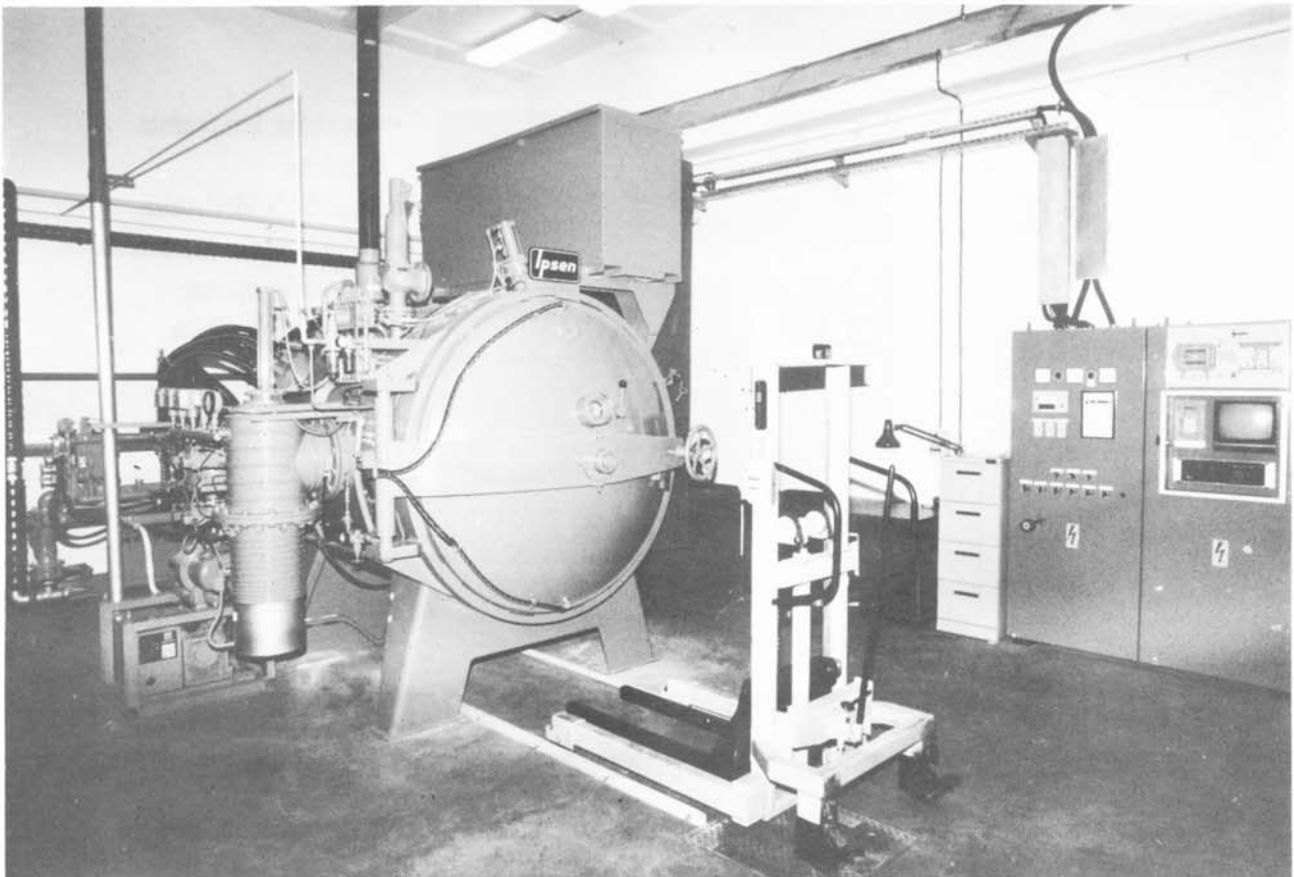
INŠTITUT ZA KOVINSKE MATERIALE IN TEHNOLOGIJE

Lepi pot 11, 61001 Ljubljana, p.p. 431

Telefon (061)151-161, Telefax (061)213-780
(prej METALURŠKI INŠTITUT)

Laboratorij za vakuumsko toplotno obdelavo, raziskave, razvoj in storitve

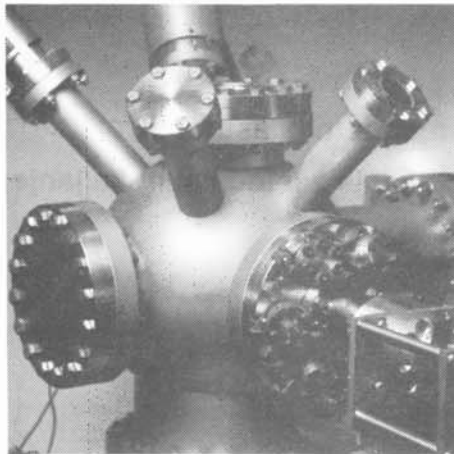
- svetlo žarjenje
- svetlo kaljenje
- raztopno žarjenje
- razplinjevanje
- žarjenje za poboljšanje magnetnih lastnosti
- visoko temperaturno spajkanje z istočasnim kaljenjem
- sintranje
- difuzijsko varjenje



Vakuumska peč IPSEN VTC-324 R

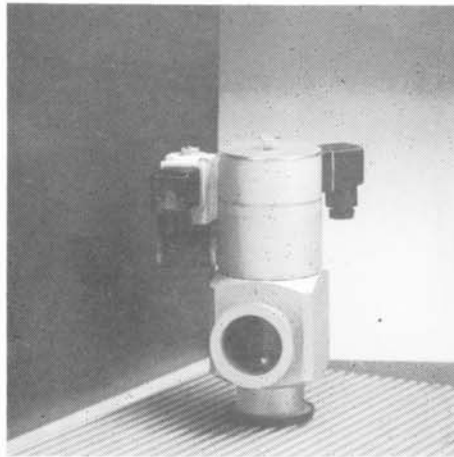
IEVT

RAZISKAVE, RAZVOJ, STORITVE:



- vakuumska, visokovakuumska in ultravakuumska tehnika
- vakuumske tehnologije
- tehnologije tankih plasti
- površinska analitika

IZDELKI:



- vakuumske komponente in sistemi
- elementi za elektroniko
- optoelektronske komponente
- elektronska oprema
- naprave za medicino

ŽELIMO VAM USTREČI – POKLIČITE NAS !

IEVT

**INŠTITUT
ZA ELEKTRONIKO
IN VAKUUMSKO
TEHNIKO**

61111 LJUBLJANA, TESLOVA ULICA 30, POB 59,
JUGOSLAVIJA

Telefon: 061 267-341, 267-377, 263-461

Telefax: 061 263-098, Telex: 31629 YU IEVT

Univerza v Ljubljani

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija

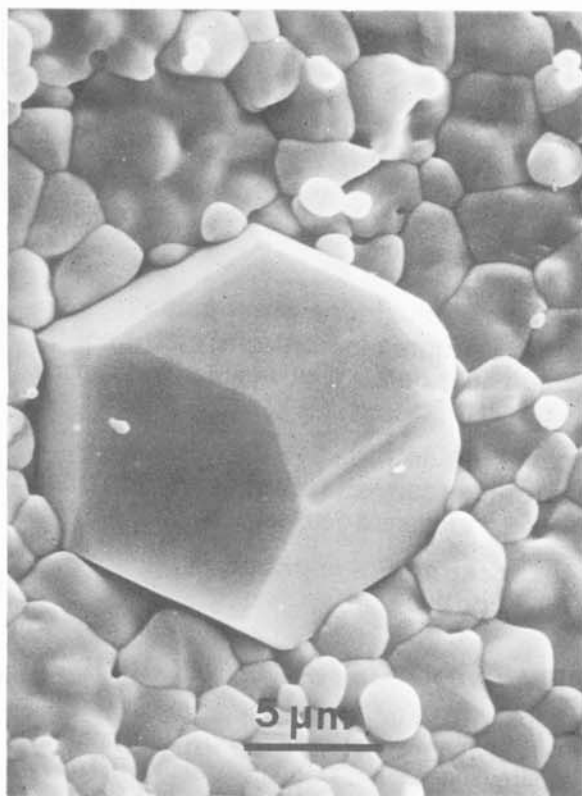
Jamova 39, 61111 Ljubljana, Tel.: (061) 159-199, Fax: (061) 161-029



Odsek za keramiko

LABORATORIJ ZA MIKROSTRUKTURNO ANALIZO

Na Institutu "Jožef Stefan" je v okviru Odseka za keramiko organiziran **laboratorij za mikrostrukturno analizo materialov**. Dejavnost skupine je namenjena podpiranju raziskovalnih programov v odseku in zunaj njega. Osnovno opremo laboratorija sestavljajo **optični mikroskopi, transmisijski in vrstični elektronski mikroskop z analizatorjema energijske porazdelitve karakterističnih žarkov X, elektronski mikroanalizator** ter naprave za pripravo vzorcev.



Prelomna površina keramike ZnO

IZOBRAŽEVANJE NA PODROČJU KERAMIČNIH MATERIALOV

Odsek za keramiko na Institutu "Jožef Stefan" je pripravil v sodelovanju z Oddelkom za keramiko na Zavodu za raziskavo materiala izobraževalni program za strokovnjake, ki delajo ali šele iščejo informacije na področju keramičnih materialov. Organiziramo seminarje, ki obsegajo predavanja in razgovore po izbiri naročnika. Prav tako prilagajamo zahtevam udeležencev seminarja obseg in nivo predavanj na posameznih temah. Na željo in v okviru možnosti organiziramo tudi praktično delo v naših laboratorijih.

Osnovni seminar obsega 30 ur in vključuje naslednje teme:

- Fizikalno kemične osnove keramike
- Sintranje in keramična mikrostruktura
- Osnovne tehnologije tehnične keramike
- Surovine za proizvodnjo keramike
- Keramika v elektrotehniki in elektroniki
- Konstrukcijska keramika
- Možnosti in smeri razvoja tehnične keramike

Poleg izobraževanja vam svetujemo pri razvojnih problemih ter pri iskanju novih razvojnih smeri.

V Odseku za keramiko ali na institutih, s katerimi sodelujemo, so na voljo tudi instrumenti in metode za kvantitativno stereološko analizo, za rentgensko strukturno analizo, meritve specifične površine, termične meritve in ostalo. Tako imamo možnost opraviti ali organizirati najzahtevnejšo karakterizacijo materialov. Velik pomen **mikrostrukturne analize** je posledica spoznanja o temeljnem vplivu mikrostrukture na lastnosti materialov. To še posebej velja za polikristalne materiale, kjer razumevanje pojavov **na mejah med zrni** omogoča krojenje lastnosti **nove generacije elektronskih in inženjerskih materialov**.

Sodelavci laboratorija, doktorji, magistri, inženirji in tehniki obvladajo poleg metod karakterizacije tudi široko področje sinteze in poznajo lastnosti anorganskih, predvsem keramičnih materialov, saj so vključeni v raziskovalne skupine Odseka za keramiko ter v mešane razvojne skupine, kjer sodelujejo tudi strokovnjaki iz industrije.



PRODAJNI PROGRAM

Vakuumske črpalke:

- ❖ rotacijske vakuumske črpalke in pribor - eno in dvostopenjske, od 1 do 1200 m³/h
- ❖ Roots vakuumske črpalke od 150 do 13.000 m³/h
- ❖ črpalke z zapiralno loputo, eno in dvostopenjske, do 250 m³/h
- ❖ dvostopenjske membranske in ejektorske vakuumske črpalke
- ❖ difuzijske črpalke od 40 do 50.000 l/s
- ❖ turbomolekularne črpalke od 50 do 3.500 l/s in pribor
- ❖ sorpcijske črpalke, kriočrpalke, ionsko-getrske in sublimacijske titanske črpalke

vakuumski črpalni sistemi:

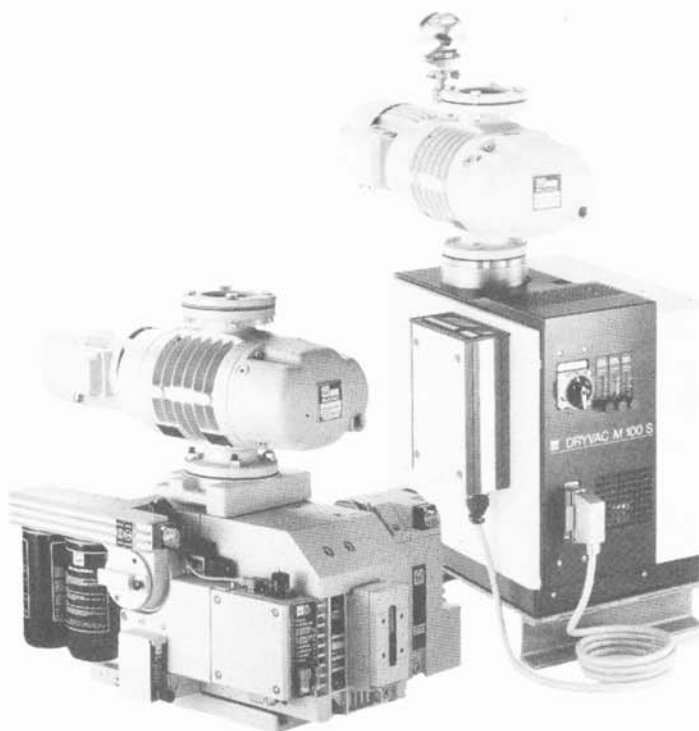
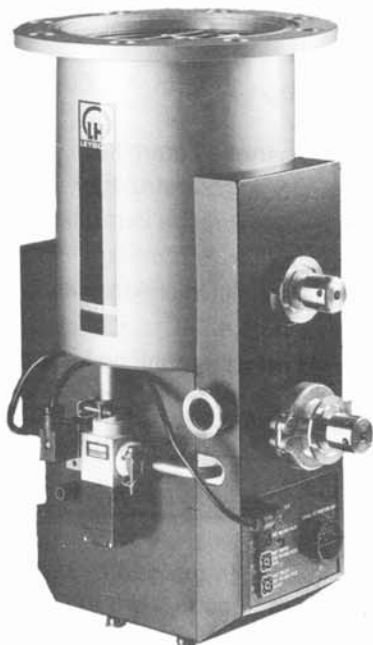
- za kemično in drugo industrijo

vakuumski ventili:

- pretočni ali kotni KF, ISO-K, ISO-F od 2 do 1.000 mm,
- loputni in UVV ventili

vakuumske prirobnice:

- serije KF, ISO-K, ISO-F in UHF, objemke in steklena okna



mehanske in električne prevodnice merilniki vakuuma in kontrolni instrumenti:

- od 1.10⁻¹² do 2.000 mbar, absolutni ali merilniki delnih tlakov

procesni regulatorji detektorji netesnosti (prepuščanja) in sistemi

- helijski, frigenjski detektorji

masni spektrometri in pribor

- od 1 do 200 ame

IZDELAVA STROJEV IN TEHNOLOGIJE ZA:

- ❖ skupina UB - trdi sloji, kondenzatorske in pakirne folije, naparevanje velikih površin, npr. steklo, naparevanje video in audio trakov, CD in video plošče, plošče za shranjevanje podatkov
- ❖ skupina UC - fina optika, očala (komponente - merjenje tankih plasti, elektronski topovi), LCD prikazalniki, okrasne tanke plasti, plasti za mikroelektroniko, naprave za izdelavo kristalov
- ❖ skupina UM - vakuumske indukcijske peči (tudi za vlivanje), vakuumska metalurgija

ZASTOPSTVO IN SERVIS

MEDIVAK

MEDIVAK d.o.o., Šolska ulica 21, 61230 Domžale
Tel.: (061) 713-060, Fax: (061) 713 060

PRODAJA

TEAM TRADE

Poštni naslov: TEAM TRADE,
61241 Kamnik, p.p. 43, Slovenija

Pisarna: 61000 LJUBLJANA
Cesta v Rožno dolino 42
Telefon (061) 272-566
Telefax (061) 263-143
Račun SDK 50140-601-85343

NDT - KONTROLA BREZ PORUŠITVE MATERIALA

OPTIČNA KONTROLA

- SCHOELY, ZRN, - KEYENCE, JAPONSKA

- ✱ ogledala in povečala, endoskopi in fibroskopi, foto in TV dokumentacija ter TV kontrola cevi
- ✱ posebni prenosni aparati za optično kontrolo površine vseh vrst materialov s povečavo do 1000-krat (novo)

Kontrola s penetrantskimi tekočinami

- HELLING, ZRN

- ✱ MET-L-CHEK rdeče-beli in fluorescentni penetranti
- ✱ STANDARD CHEK penetranti, SUPER CHEK penetranti za visoke temperature, BY LUX penetranti
- ✱ kontrolni etaloni in aparati, ročni, pol-avtomatski in avtomatizirani sistemi
- ✱ UV luči za fluorescentno metodo

Magnetna kontrola - HELLING, ZRN

- ✱ oprema za magnetiziranje, permanentni magneti, ročni elektromagneti, prenosne enote - do 4000 A
- ✱ standardna stacionarna oprema in izdelava opreme po naročilu ter popolnoma avtomatizirana oprema
- ✱ aparati za demagnetiziranje, kontrolni aparati in etaloni
- ✱ sredstva za kontrolo: prahovi in suspenzije raznih barv in velikosti, UV luči za fluorescentno metodo

Kontrola z vrtnčastimi tokovi - ROHMANN, ZRN

in ultrazvočna kontrola - PANAMETRICS, ZDA/ZRN

- ✱ prenosni aparati za kontrolo materialov, merilniki debelin materialov



- ✱ visokofrekvenčni prenosni in stacionarni aparati, popolnoma avtomatizirani linijski sistemi
- ✱ vse vrste sond in pribora

Radiografska kontrola - ANDREX, DANSKA, - HELLING, ZRN, - GRAETZ, ZRN

- ✱ prenosni RTG aparati do 300 kV, stacionarni RTG aparati do 450 kV
- ✱ aparati za gama-radiografijo IR 192, CO 60 in pribor, izotopska polnjenja IR 192, CO 60 in ostalo
- ✱ radiografski pribor, aparati za pregled RTG filmov - iluminatorji
- ✱ radiološka zaščita - dozimetri
- ✱ konstrukcija in izdelava foto-RTG laboratorijev v vozilih, zabojnikih in drugih prostorih

Industrijski RTG filmi in kemikalije

- RAZLIČNI PROIZVAJALCI

Kontrola netesnosti / prepuščanja

- LEYBOLD, ZRN, - HELLING, ZRN

- ✱ helijevi, freonski in ultrazvočni detektorji
- ✱ s fluorescentnimi tekočinami

Analize materialov

- SPECTRO, ZRN, - LEYBOLD, ZRN

- ✱ spektralne analize raznih vrst materialov:
 - optično emisijski spektrometri
 - rentgensko fluorescenčni spektrometri
- ✱ masni spektrometri za analizo raznih vrst plinov
- ✱ aparati za analizo tekočin in plinov
- ✱ pribor

Druge vrste NDT kontrole - HELLING, ZRN,

- MES, HOČE, - TEMPIL DIVISION, ZDA

- trdote, hrapavosti, izolacije, vlažnosti, kontrola kvalitete in namazanosti ležajev
- debelin in kvalitete premazov ter zaščit na kovinah
- temperature - TEMPILSTIK in digitalni merilniki - DRUGI MERILNIKI



TEAM TRADE d.o.o.

Poštni naslov: TEAM TRADE, 61241 Kamnik, p.p. 43, Slovenija

Pisarna: 61000 LJUBLJANA
Cesta v Rožno dolino 42
Telefon (061) 272-566
Telefax (061) 263-143
Račun SDK 50140-601-85343

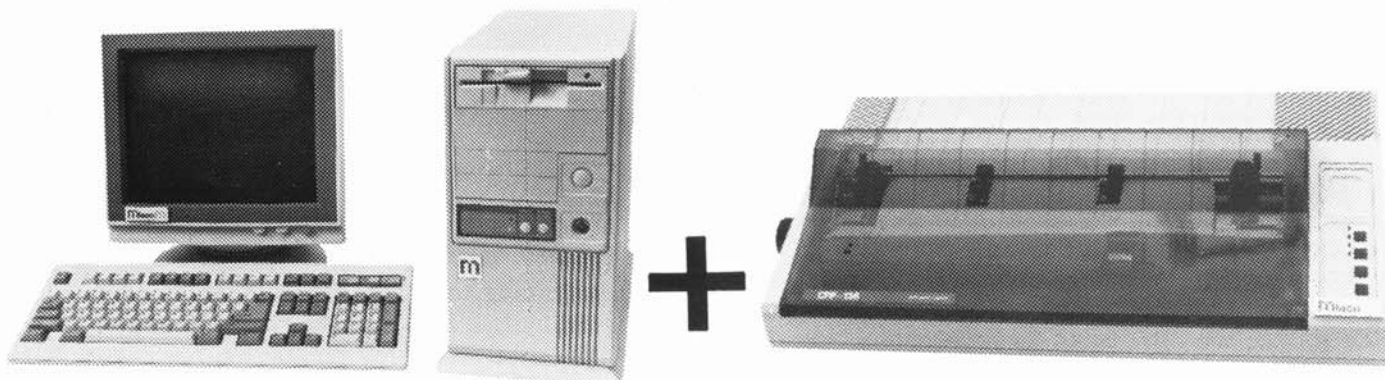


MLAKAR & CO

Unterbergen 82
A-9163 UNTERBERGEN I. Ros.
AUSTRIJA
Tel. 0 42 27/23 33, Telex 42 2749
Fax 04227-2091

Prodaja računalnikov v kit izvedbi
(po delih) in dopolnilne računalniške
opreme. Za vse naprave ponujamo
jamstvo, montažo in servis v Ljubljani,
MLACOM, Koželjeva 6.

Za nasvet pri izbiri nas pokličite po telefonu ali zahtevajte ponudbo po telefaxu. Naša trgovina je v Avstriji ob glavni cesti proti Celovcu, 60 km od Ljubljane in 12 km od Ljubelja. Odprta je vsak dan od 9. do 18. ure, v soboto od 8. do 13. ure.



MLACOM vam poleg računalnika nudi bogat dopolnilni program dodatne opreme, ki jo potrebujete pri delu z računalnikom. V sodobno opremljenem servisu vam v najkrajšem času sestavimo računalnike ali odpravimo napake na računalnikih, monitorjih, napajalnikih, tiskalnikih in drugi opremi. Oglasite se pri nas vsak dan od 8. do 12. ure in od 13. do 17. ure ter vsako prvo soboto v mesecu od 8. do 13. ure.

IZ NAŠEGA ŠIROKEGA PRODAJNEGA PROGRAMA:

MLACOM Computer Classic

Classic je namenjen splošni uporabi.

Predstavlja poceni, vendar zmogljiv računalnik na osnovi procesorja 268-16 MHz. Vsebuje 1 MB notranjega pomnilnika, 40 MB trdi disk in monokromatski monitor. Namenjen je vsakdanjemu računalniškemu delu, npr. po pisarnah za obdelavo tekstov, razpredelnic in baz podatkov. Zelo je primeren tudi za šolske ustanove.

MLACOM Computer Business

Business je namenjen obdelavi večjih podatkovnih baz. Osnova je procesor 268-16. Vsebuje 2 MB notranjega pomnilnika, hitri trdi disk 130 MB in monokromatski monitor. Zaradi velikega in hitrega trdega diska je primeren predvsem za obdelavo večjih podatkovnih baz. Svetujemo ga npr. za fakturiranje, vodenje zalog, knjigovodstvo itd.

MLACOM Computer Rainbow

Rainbow je računalnik za tiste, ki se nočejo odpovedati barvam. Osnova je procesor 386SX-16 MHz. Vsebuje 2 MB notranjega pomnilnika, 40 MB trdi disk in VGA barvni monitor. Zelo je primeren za delo s programi, ki tečejo pod Windows.

MLACOM Computer Publisher

Publisher je namenjen namiznemu založništvu.

Osnova je procesor 386-33MHz s 64 KB Cache. Vsebuje 4 MB notranjega pomnilnika, koprocesor, trdi disk 107 MB in A4 17" monitor. Namenjen je vsem tistim, ki se ukvarjajo z namiznim založništvom.

MLACOM Computer Graphic

Graphic je namenjen grafični obdelavi. Osnova je procesor 386-33MHz s 128 KB Cache. Vsebuje 8 MB notranjega pomnilnika, koprocesor, trdi disk 130 MB in 17" barvni monitor.

MLACOM Computer Professional

Professional je računalnik za tiste, ki ne trpijo kompromisov in hočejo najboljše. Osnova je procesor 486-25MHz s 64 KB Cache in EISA vodilom. Vsebuje 8 MB notranjega pomnilnika, trdi disk 338 MB, barvni monitor.

MLACOM Computer Server

Namenjen je kot server za postavitve mreže. Osnova je procesor 386-33MHz s 128 KB Cache. Vsebuje 8 MB notranjega pomnilnika, trdi disk 337 MB/10 MS SCSI (Novell predformatiran), NE-2000 kompatibilni mrežni adapter in monokromatski monitor.

Koželjeva 6, 61000 Ljubljana
Tel: 061-114-131
Fax: 061-114-350

mlacom
Mlacom d.o.o.