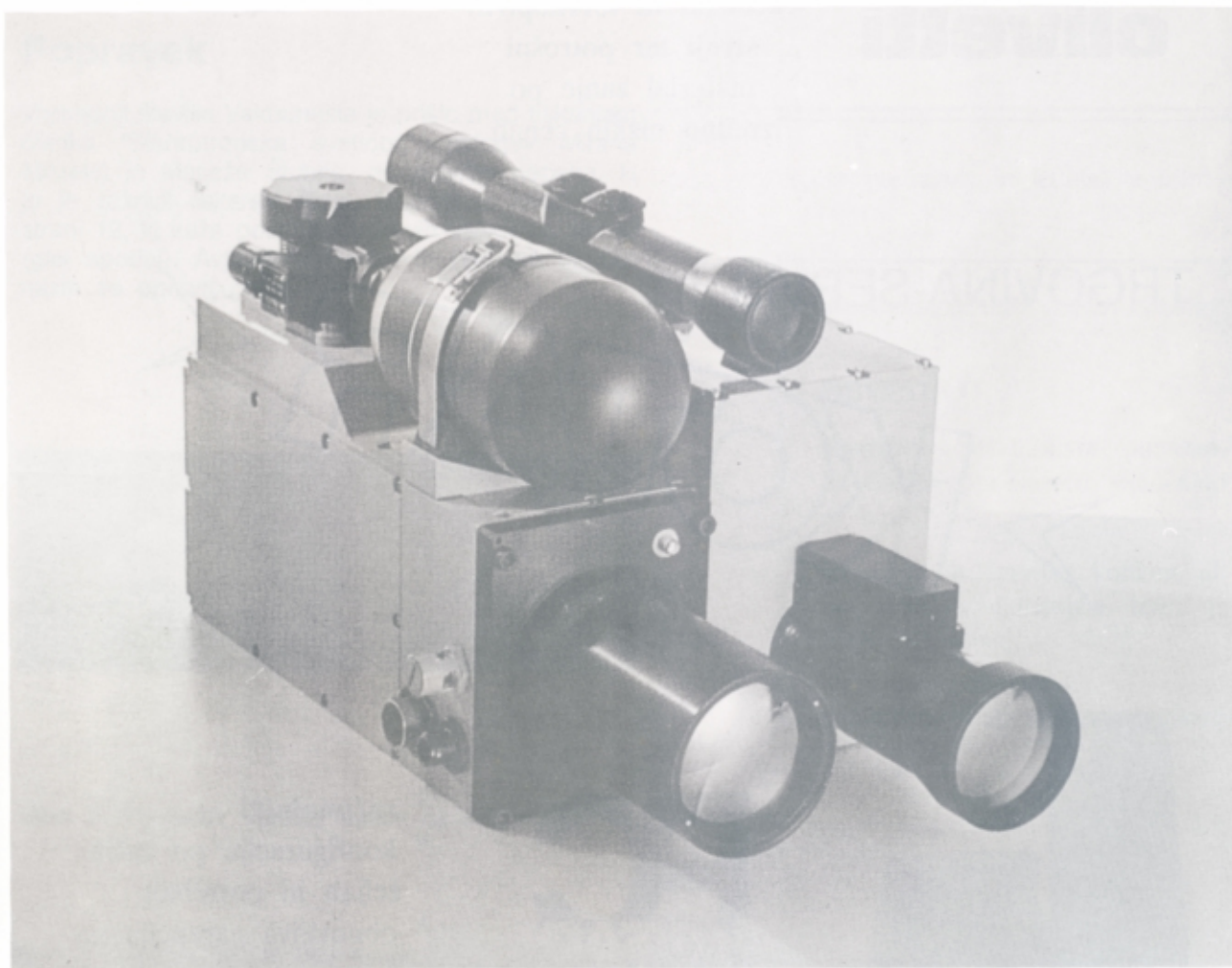


VAKUUMIST

GLASILO DRUŠTVA ZA VAKUUMSKO TEHNIKO SLOVENIJE

LJUBLJANA, MAREC 94

letnik 14, št. 1, 1994



VSEBINA

- ☐ Korozija materialov (I. Milošev)

- ☐ Zaprti mini TEA CO₂ laser za uporabe v merilni tehniki (J. Hozjan)

- ☐ Trde zaščitne prevleke (II. del) (P. Panjan, B. Navinšek, A. Žabkar, A. Cvelbar)

- ☐ Študij ozadja v ramanskih spektrih a-Si:H (M. Ivanda, D. Gracin, S. Lugomer, K. Furić, O. Gamulin)

- ☐ Zgodovina vakuumске tehnike (III. del) (S. Južnič)

- ☐ NASVETI

Slika na naslovni strani prikazuje CO₂ laserski razdaljemer, ki so ga razvili in izdelali v **Iskri Elektrooptiki**, Ljubljana.

OBVESTILO

NAROČNIKE VAKUUMISTA prosimo, da čim prej poravnate naročnino za leto 1994.

Cena štirih števil, kolikor jih bo izšlo v letošnjem letu, je 1000,00 tolarjev.

SPONZORJI VAKUUMISTA:

- Ministrstvo za znanost in tehnologijo Slovenije
- Ministrstvo za šolstvo in šport Slovenije
- Institut "Jožef Stefan", Ljubljana

- ☐ VAKUUMIST
- ☐ Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije
- ☐ Glavni in odgovorni urednik: Peter Panjan
- ☐ Uredniški odbor: Andrej Demšar, dr. Jože Gasperič (urednik za področje vakuumске tehnike in sistemov), dr. Bojan Jenko, dr. Monika Jenko (urednica za področje vakuumске metalurgije), dr. Alojzij Križman, mag. Miran Mozetič, mag. Vinko Nemanič, Marijan Olenik, Andrej Pregelj, dr. Vasilij Prešern in dr. Anton Zalar
- ☐ Lektorja: dr. Jože Gasperič in mag. Bojan Povh
- ☐ Naslov: Uredništvo Vakuuma, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 61000 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

KOROZIJA MATERIALOV

Ingrid Milošev, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

ABSTRACT

The fundamentals of corrosion processes are reviewed, including: basic corrosion principles shown for the case of a simple corrosion cell, principles of electrochemical measurements, types of corrosion attack and methods of corrosion protection. Polarization curves for iron and copper are used to discuss the processes of electrochemical corrosion and passivation. Basic corrosion principles for the system substrate/coating are also included. Examples are given for TiN and CrN hard coatings, as well as for NiCr protective coatings.

POVZETEK

V prispevku so obravnavane splošne značilnosti korozijskih procesov. Osnovni principi so opisani na primeru enostavne korozijske celice. Na kratko so predstavljene osnove elektrokemijskih meritev, oblike korozijskega napada, kot tudi metode zaščite pred korozijo. Procesi elektrokemijske korozije in pasivacije so razloženi na primeru polarizacijskih krivulj za železo in baker. V prispevku so obravnavane tudi značilnosti sistema podlaga/prevleka. Podano je nekaj izbranih rezultatov korozijskih raziskav trdih in zaščitnih prevlek.

1 SPLOŠNI PRINCIPI KOROZIJE

1.1 Uvod

Korozijo definiramo kot fizikalno-kemijsko reakcijo med materialom in njegovim okoljem, ki povzroči spremembe lastnosti tega materiala in pogosto škodljivo vpliva na njegovo nadaljnje delovanje /1/. Splošno kovine v naravi težijo za tem, da preidejo v bolj stabilne oblike, ki so za večino med njimi njihovi oksidi, sulfidi in podobne spojine. Prav ta težnja predstavlja gonilno silo korozije: kovina prehaja v svojo bolj stabilno obliko, pri čemer se sama raztaplja oziroma korodira. V principu so vsi materiali izpostavljeni kontinuirnemu korozijskemu napadu, pri čemer je seveda v tehničnem smislu pomembna hitrost tega procesa.

Ne glede na to, ali se korozija pojavlja na kovinah ali zlitinah, izpostavljenih vodi, zraku ali zemlji, se moramo zavedati, da je le-ta v osnovi elektrokemijski proces in da torej prihaja do električnega toka od ene proti drugi kovini skozi elektrolit. Na sliki 1 je prikazan korozijski proces v poenostavljeni obliki /2/. Celica predstavlja zaprt električni krog. V enostavnem primeru imamo v raztopini dve kovinski elektrodi, potopljeni v elektrolit: anoda (manj plemenita kovina, na kateri poteka oksidacija) je na primer železo, medtem ko je katoda (bolj plemenita kovina, na kateri poteka redukcija) na primer baker. Ker je železo manj plemenita kovina (njegov potencial je bolj negativen), se bo raztapljalo, torej bo na železu potekala oksidacija. Splošno lahko zapišemo:

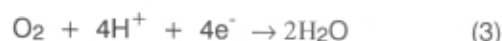


kjer je Me kovina, n število elektronov e, ki se izmenjujejo v reakciji.

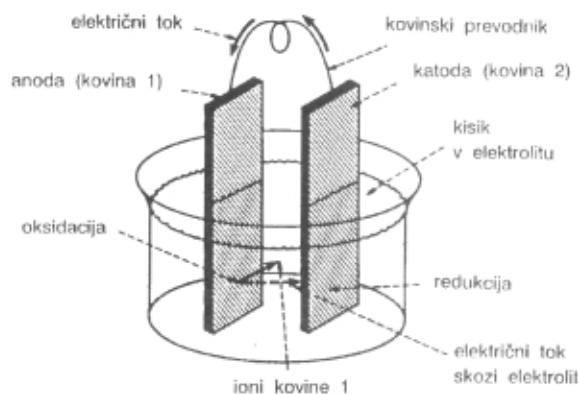
Na bakreni elektrodi, ki je v tem primeru katoda, bo potekalo izločanje vodika po reakciji:



Če je v raztopini prisoten kisik, bo katodna reakcija njegova redukcija, ki jo zapišemo:



Gonilna sila procesa je razlika potencialov med dvema kovinama. Tak proces lahko poteka tudi na površini ene same kovine, če je le-ta nehomogena, torej če je potencial na nekaterih mestih bolj negativen od drugih (npr. različni vključki na površini). V tem primeru imamo ponavadi opravka z lokalnim korozijskim napadom. Pri atmosferski koroziji prevzame vlogo elektrolita vodna plast, ki nastane na vsaki kovinski površini zaradi adsorpcije atmosferske vlage. Pri različnih konstrukcijah, ki so v stiku z zemljo, lahko elektrone, ki nastajajo v procesu oksidacije, prevzame zemlja, ki ponavadi vsebuje disperzne kovinske delce; če je prisoten elektrolit in je zemlja bolj negativna od kovine, se bo vzpostavil električni tok od kovine proti zemlji, kar povzroči korozijo.



Slika 1. Shematično prikazan proces korozije pri stiku dveh kovin

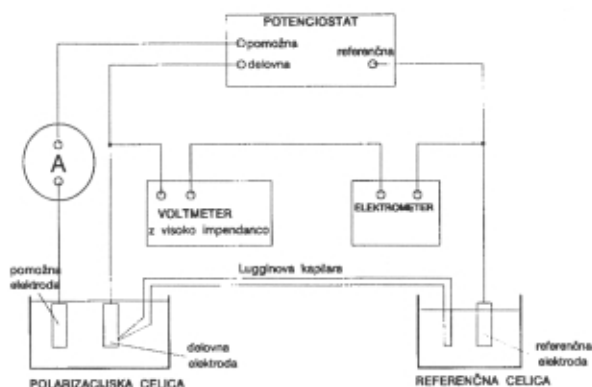
Korozijski proces, ponazorjen na sliki 1, je dokaj enostaven. Kljub temu je škoda, ki jo povzroča raztapljanje materiala, ogromna. V Združenih državah Amerike so izračunali, da povzroči korozija približno 70 milijard dolarjev škode letno /2/. Ta podatek je dovolj zgovoren, kako pomembno je dobro poznavanje lastnosti posameznih materialov in njihovo vedenje v nekem okolju. Pridobljena znanja bodo pripomogla k pravilni izbiri materialov za posamezne namene

ter tako omogočila nemoten potek tehnoloških procesov v industriji.

1.2 Elektrokemijsko merjenje korozije

Ko je vzorec kake kovine ali zlitine potopljen v raztopino (korozijski medij), potekata na njegovi površini reakciji oksidacije in tudi redukcije. Navadno se vzorec oksidira, oksidacijsko sredstvo iz raztopine pa se reducira. Vzorec torej istočasno deluje kot anoda in katoda, na njegovi površini pa se razvijajo anodni in katodni tokovi. Pri preučevanju korozijskih procesov je zaželeno kontrolirati elektrokemijsko vedenje vzorca, zato ga prisilimo, da se vede bodisi kot anoda bodisi kot katoda. Tako lahko ločeno študiramo anodne in katodne procese in lažje razumemo vedenje vzorca v posameznem mediju.

Ko je vzorec v kontaktu z raztopino in ni priklopljen na zunanji vir napajanja, se v sistemu vzpostavi tako imenovani korozijski potencial, E_{kor} . Definiramo ga lahko kot potencial, pri katerem sta hitrosti oksidacije in redukcije enaki. Pomembno je torej, da pri korozijskem potencialu tečejo katodni in anodni tokovi, njihova vsota pa je enaka nič. Če pa vzorec počasi "polariziramo" v pozitivno smer¹, tj. ga prisilimo, da se vede kot anoda, bo anodni tok večji od katodnega. Če vzorec polariziramo še bolj pozitivno, postane katodna komponenta toka zanemarljiva glede na anodno. Polariziramo lahko tudi v negativno smer glede na korozijski potencial; v tem primeru bo anodni tok zanemarljiv v primerjavi s katodnim.

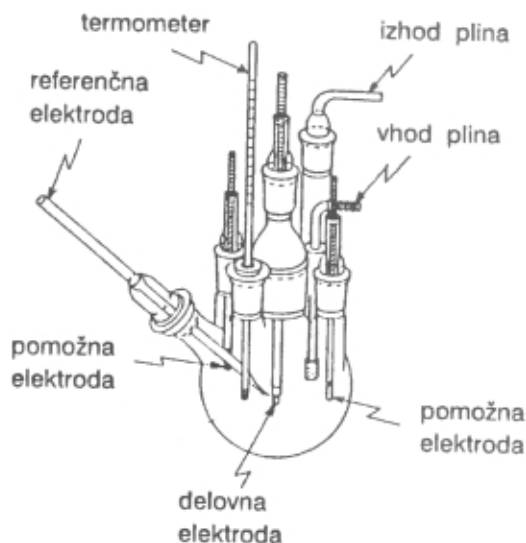


Slika 2. Električna shema elektrokemijske meritve s kontrolo potenciala

Na sliki 2 je podana shema aparature za elektrokemijske meritve, ki potekajo s krmiljenjem potenciala. Sestavlja jo troelektrodna korozijska celica, ki je povezana z zunanjim virom napajanja - potenciostatom. Funkcija le-tega je, da ustvari na delovni elektrodi (vzorec, ki ga raziskujemo) določen

potencial. Potenciostat ga krmili bodisi tako, da ga vzdržuje konstatnega, bodisi tako, da ga linearno ali korakoma spreminja s časom. Merimo nastali tok na delovni elektrodi. Značilna korozijska celica s prostornino 1 dm³ je prikazana na sliki 3. Vsebuje delovno, referenčno in pomožno elektrodo, kot tudi možnost uvajanja plina v raztopino in kontrolo temperature. Vzorec, ki ga raziskujemo, je delovna elektroda. Navadno ima obliko diska s površino približno 1 cm², ki ga vtisnemo v teflonski nastavek, tako da je samo ena površina izpostavljena raztopini. Referenčno elektrodo, to je elektrodo, glede na katero merimo potencial delovne elektrode, izberemo glede na eksperimentalne pogoje v sistemu. Navadno uporabljamo nasičeno kalomelovo elektrodo (N.K.E.), elektrodo živo srebro/živosrebrov(II)sulfat ali elektrodo srebro/srebrov(I)klorid. Pomožni elektrodi s katerima polariziramo, sta grafitni palici. Lahko uporabimo tudi platinsko elektrodo.

Na Odseku za fizikalno kemijo in kemijo okolja imamo sodoben instrument - kombiniran potenciostat/galvanostat firme Princeton Applied Research, model 273, ki je povezan z osebnim računalnikom. Omogoča nam uporabo vrste specifičnih elektrokemijskih metod, ki vključujejo potenciodinamični, potenciostatski ali galvanostatski način kontrole razmer v korozijski celici.

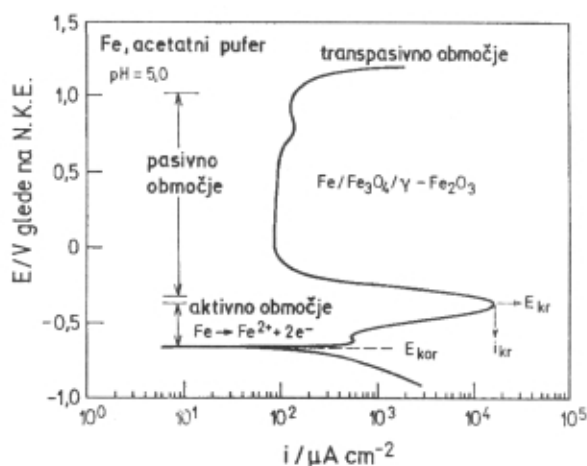


Slika 3. Shematično prikazana troelektrodna korozijska celica

Ena izmed najbolj razširjenih elektrokemijskih metod v korozijskih raziskavah je potenciodinamična polarizacija. Pri tej metodi delovno elektrodo polariziramo do nekega potenciala, ki ga zatem linearno spreminjamo s časom v pozitivni ali negativni smeri. Eksperimentalno merimo odvisnost toka od potenciala polarizacije. Ker se lahko merjeni tok spreminja tudi za več velikostnih razredov, navadno narišemo polarizacijske krivulje kot odvisnost logaritma toka od potenciala (log I proti E). Tako krivuljo imenujemo potenciodinamična polarizacijska krivulja.

¹ Na vzorec pritismo neki potencial s potenciostatom. Merjeni tok je razlika med anodnim in katodnim tokom.

Na sliki 4 je prikazana potenciodinamična polarizacijska krivulja za železo v kislem mediju, kjer lahko opazimo značilna območja korozije in pasivacije /3/. Pri potencialih, bolj negativnih od korozijskega, bo na površini vzorca prevladovala katodna reakcija (reakcija 2). Pri tistih, ki so bolj pozitivni od E_{kor} , se začne reakcija oksidacije vzorca (reakcija 1). To območje, v katerem vzorec korodira, imenujemo tudi aktivno. Vrednost gostote toka se povečuje s premikanjem potenciala v pozitivno smer. Korozija železa bo potekala do kritičnega potenciala E_{kr} , ko pride do nenadnega zmanjšanja hitrosti korozije tudi za nekaj velikostnih razredov (hitrost korozije je v tem primeru izražena z velikostjo kritičnega toka, i_{kr}). Po hitrem tokovnem padcu se vzpostavi pasivno stanje, v katerem ostane tok kljub nadaljnjemu povečanju potenciala konstanten. Pasivno območje je omejeno s povečanjem gostote toka zaradi prehoda v transpasivno območje. Večji tok je posledica ponovne oksidacije (tvorba spojin z višjim oksidacijskim stanjem glede na tisto v pasivnem območju; značilno npr. za krom ali nikelj) ali pa izločanja kisika pri še višjih potencialih.

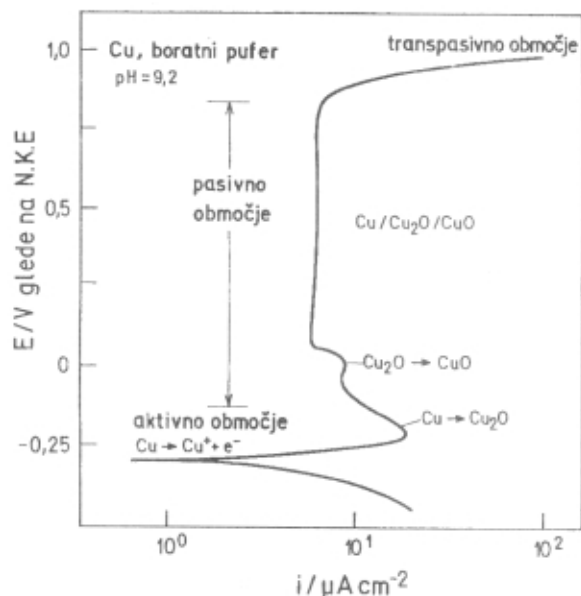


Slika 4. Potenciodinamična polarizacijska krivulja za železo v acetatnem pufru, pH=5,0. Hitrost spreminjanja potenciala s časom je bila 10 mV s^{-1} .

Oblika potenciodinamične polarizacijske krivulje podaja osnovne informacije o elektrokemijskem in korozijskem vedenju kovine ali zlitine v določenem korozijskem okolju, kot tudi podatke o mehanizmu procesa korozije. Meritve so relativno hitre, od nekaj minut do nekaj ur, odvisno od hitrosti spreminjanja potenciala s časom. S to metodo raziskujemo nagnjenost materiala do pasivacije, vpliv dodatkov inhibitorja, posameznih elementov v zlitino in podobno. Pri tem je kriterij korozije vrednost kritičnega toka. Da bi dobili velikost hitrosti korozije, moramo uporabiti metodo Tafelove ekstrapolacije in polarizacijsko upornost /1/.

1.3 Elektrokemijska pasivacija

Padec gostote toka med potenciodinamično polarizacijo v pasivnem območju, slika 4, je posledica nastajanja tanke kontinuirne plasti na površini vzorca, v večini primerov oksidne plasti. Poleg oksidov so lahko pasivne plasti tudi druge spojine, npr. slabo topne soli. Na fazni meji tanke plasti in elektrolita lahko potekajo tri delne reakcije, namreč prenos ionov kovine skozi trdno plast ("korozija v pasivnem stanju"), prenos ionov O^{2-} ali OH^- , ali tudi redoks reakcije, če plast ni elektronski izolator. Raztapljanje in rast te plasti vključuje prenos ionov skozi trdno fazo, kar zahteva veliko jakost električnega polja (do 10^6 V cm^{-1}). Majhna hitrost reakcije prenosa ionov iz oksida v elektrolit je v večini primerov vzrok za nastajanje zaščitnih in stabilnih plasti. Klasičen zgled je železo v kisljih elektrolitih, slika 4. Čeprav lahko pričakujemo, da se bo korozija železa nenehno povečevala s povečevanjem potenciala v pozitivno smer, prihaja pri približno -0,4 V glede na nasičeno kalomelovo elektrodo (N.K.E.) do zmanjšanja gostote toka za dva velikostna razreda. Pasivacija železa je posledica tvorbe zaščitne oksidne plasti na njegovi površini, ki je sestavljena iz notranje Fe_3O_4 in zunanje plasti $\gamma-Fe_2O_3$ /3/.



Slika 5. Potenciodinamična polarizacijska krivulja za baker v boratnem pufru, pH=9,2. Hitrost spreminjanja potenciala s časom je bila $0,5 \text{ mV s}^{-1}$.

Stabilnost zaščitne plasti je lahko tudi posledica njene slabe topnosti. Zgled za tak pojav je baker, slika 5 /4/. Do njegove pasivacije prihaja samo v nevtralnih ali alkalnih elektrolitih, v kisljih pa ne. Na površini bakra se tvori dvojna oksidna plast, sestavljena iz notranje plasti Cu_2O in zunanje CuO . Ko se površina bakra popolnoma prekrije z zunanjo plastjo, pride pri približno 0,1 V glede na N.K.E. do zmanjšanja gostote toka in prehoda v pasivno stanje. V takih primerih lahko določimo področja pasivacije

na podlagi termodinamičnih podatkov. M. Pourbaix je pripravil diagrame potencial - pH (tako imenovane Pourbaixove diagrame), ki opisujejo elektrokemijsko in korozijsko vedenje vseh kovin v vodnih raztopinah /5/. Njihova prednost je, da podajajo območja potenciala in pH, pri katerih je kovina imuna (torej ne korodira), korodira ali pa se pasivira (torej reagira, pri čemer se tvori specifičen oksid ali kompleksni ioni). Ker so diagrami osnovani na termodinamičnih podatkih, ne dajejo informacije o hitrosti posameznih procesov, kljub temu pa so izredno koristni in uporabni pri študiju. Na sliki 6 so poenostavljeni Pourbaixovi diagrami za železo in baker, ki podajajo območja imunosti, korozije in pasivacije. Glede na diagram E-pH, železo ne bi smelo biti pasivno v močno kislih elektrolitih, kar je v nasprotju z eksperimentalnimi rezultati.

Sklenemo lahko, da se pasivacija pojavi zaradi slabe topnosti pasivne plasti ali pa majhne hitrosti njenega raztapljanja oziroma zaradi termodinamičnih ali kinetičnih lastnosti sistema.



Slika 6. Poenostavljena diagrama potencial-pH za železo in baker

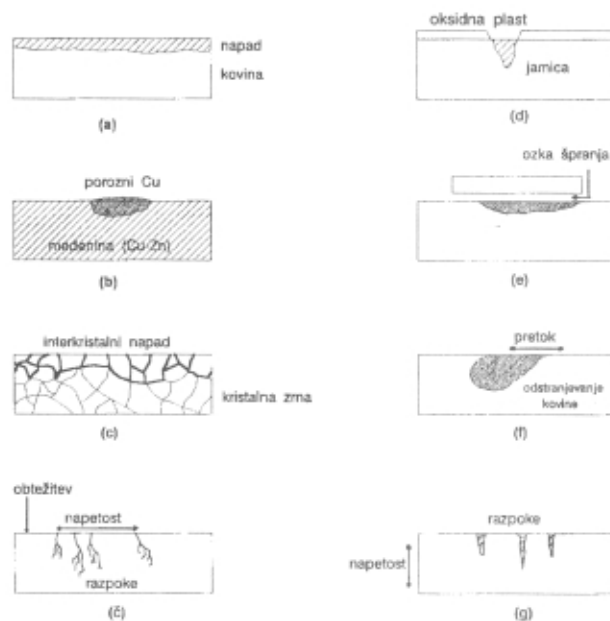
Poleg ionske prevodnosti pasivne plasti so zanimive tudi njene elektronske lastnosti. Če je pasivna plast izolator, jo lahko polariziramo do potenciala, višjega od 100 V, vendar ostane gostota toka nizka. Debelina takih oksidnih plasti je nekaj deset nm. Ta pojav je značilen za plasti na kovinah, kot so aluminij, tantal ali titan. Večina drugih kovin tvori pasivne plasti, ki imajo polprevodne lastnosti (železo, krom, baker, nikelj). V tem primeru je potencial, ki ga lahko ustvarimo na plasti, omejen s potencialom izločanja kisika. Pasivne plasti so tanjše od 10 nm.

1.4 Oblike korozijskega napada

Do sedaj smo obravnavali primer vedenja homogene kovine v okolju, kjer nastane enakomeren ali splošen korozijski napad (celotna površina kovine bo korodirala enakomerno). Shematično je to prikazano na sliki 7a. Na površini kovine so anodna in katodna mesta, ki so prostorsko in časovno naključna. Če pravilno izberemo material za posamezno okolje in poznamo hitrost njegove korozije, pripelje enakomerna korozija le redko do nevarnih poškodb. V praksi pa smo bolj zaskrbljeni zaradi lokalnega korozijskega napada, ki je omejen na posamezna mesta. V tem primeru so anodna in katodna mesta

na heterogeni površini kovine prostorsko in časovno ločena. Posledice takega napada so izredno nevarne, saj ga ne moremo pravočasno napovedati in lahko v zelo kratkem času pripelje do hitrega propada materiala. V tabeli 1 so podane osnovne značilnosti splošnega oziroma lokalnega korozijskega napada /6/.

Nekatere izmed oblik lokalnega korozijskega napada so shematično prikazane na sliki 7 /6,7/. V nadaljnjem besedilu jih bomo na kratko predstavili.



Slika 7. Shematično prikazane oblike korozijskega napada

- **Selektivna korozija** je pojav selektivnega raztapljanja nekega elementa iz zlitine, slika 7b. Najbolj znan zgled je raztapljanje cinka v medenini (raccinkanje). Podobni procesi potekajo tudi v drugih zlitinah, na primer aluminijevih, železovih, kromovih. Raccinkanje lahko hitro prepoznamo, saj se rumena barva medenine spremeni v rdečo, značilno za baker, ki ostaja v zlitini, cink pa se raztaplja. Takšne spremembe se kažejo v obliki manjših jamic, lahko pa tudi v obliki selektivnega raztapljanja, ki zavzame večje površine.
- **Interkristalna korozija** se pojavlja bodisi na mejah kristalnih zrn bodisi v njihovi neposredni bližini, slika 7c. Pri nerjavnih jeklih prihaja do takšne oblike korozijskega napada v temperaturnem območju od približno 400 do 800°C, ko se interkristalno izloča kromov karbid. Cona v bližini kristalne meje postane osiromašena s kromom in ima zaradi tega slabšo korozijsko odpornost. Temu pojavu se lahko izognemo z zmanjšanjem vsebnosti ogljika v jeklu, ali pa tako, da ogljik kemijsko vežemo s titanom ali niobijem (tako imenovana stabilizirana jekla).

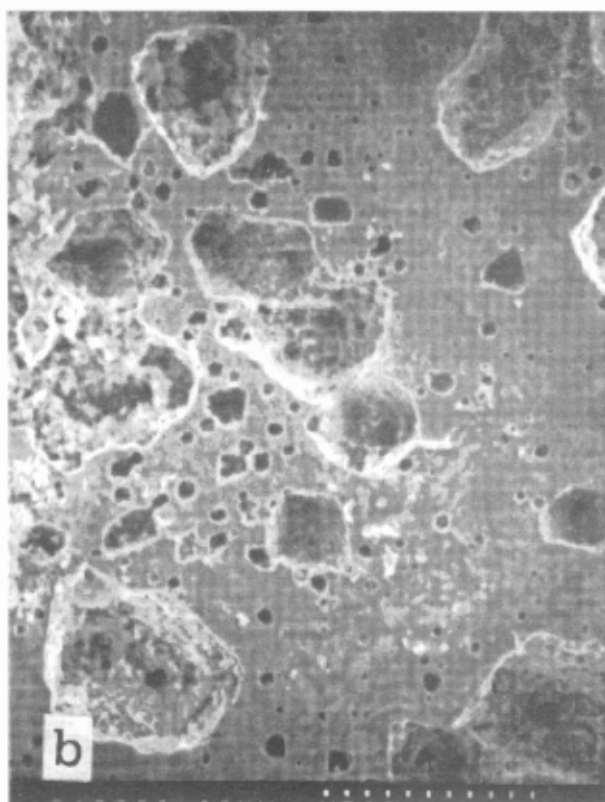
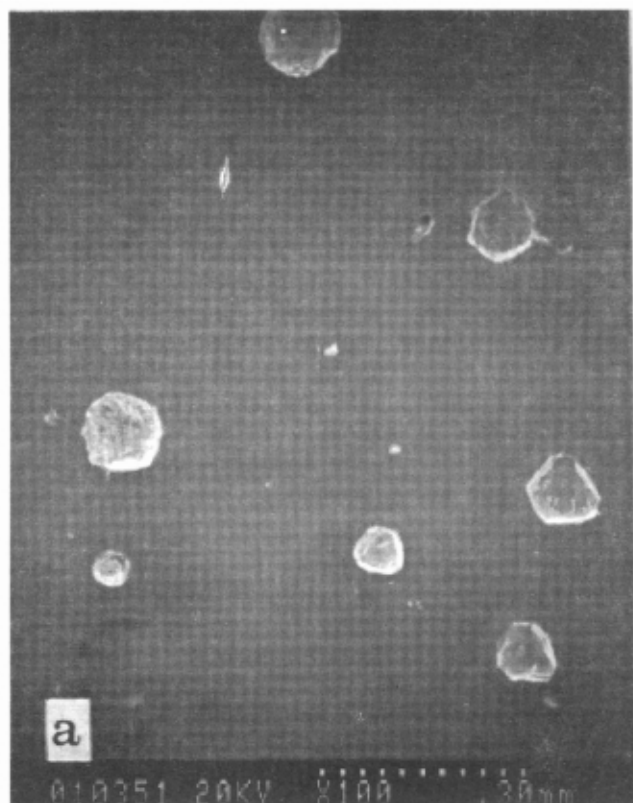
- **Napetostno korozijsko pokanje** je zelo nevarna oblika lokalnega korozijskega napada. Pojavlja se, ko je material, ki je pod mehansko obremenitvijo, izpostavljen agresivnemu korozijskemu mediju pri povišanih temperaturah, slika 7č. Prihaja do krhkega loma materiala. Večina avstenitnih jekel je podvržena napetostnemu korozijskemu pokanju, medtem ko so feritna ali dupleksna avstenitno-feritna nerjavna jekla odporna proti temu tipu korozije.
- **Jamičasta korozija** se navadno pojavlja, ko je kovina izpostavljena agresivnim ionom (halogen-skim, sulfatnim). Značilna je predvsem za kovine in zlitine, ki tvorijo pasivne plasti. Agresivni ioni napadajo posamezna mesta na pasivni površini, jih poškodujejo in povzročijo povečano raztapljanje, slika 7d. Na sliki 8a je posnetek jamice, ki je nastala na površini bakra v alkalnem mediju, ki vsebuje sulfatne ione /8/. Jamice na površini so lahko tako goste posejane, da daje površina kovine hrapav videz, slika 8b. Pri jeklih lahko povečamo odpornost proti jamičasti koroziji s povečanjem vsebnosti kroma in molidbena. V praksi se ponavadi jamičasta korozija pojavlja v mirujočih tekočinah, v različnih razpokah in podobno.
- **Korozija v špranji** je pogosto posledica delovanja majhne prostornine korozijskega medija v ozki špranji, slika 7e. Pojavlja se v obliki številnih majhnih korozijskih izjed. Lahko nastane zaradi geometrije sistema (razmik pločevin, varjeni prekriti spoji, tesnila), stika kovine z nekovino (gumo, plastiko) ali zaradi usedlin na površini kovine.

- **Erozivna korozija** je kombinacija korozije in mehanske abrazije na nekem mestu, slika 7f. Pri reševanju problemov, povezanih z erozivno korozijo, moramo upoštevati pravilno izbiro materialov, pravilno načrtovanje konstrukcije in hitrost pretoka medija. Splošno velja: čim večja je splošna korozijska odpornost in trdota materiala, tem boljša je odpornost proti erozivni koroziji.
- **Korozijsko utrujanje** je pokanje kovine zaradi istočasnega vzajemnega delovanja korozijskega medija in ponavljajoče se spremenljive napetosti, slika 7g. Korozijsko utrujanje napreduje hitro, prelomi pa so krhki in navadno transkristalni. Jeklene površine so občutljive na korozijsko utrujanje v različnih medijih, kot so sladka in morska voda, raztopine različnih kemikalij itd.

1.5 Zaščita pred korozijo

Številne postopke, ki so bili razviti za zaščito pred korozijo, lahko splošno razdelimo na:

- a) izbiro materialov in oblikovanje konstrukcij
 - b) modifikacijo elektrolitov
 - c) spremembo elektrodnega potenciala
 - č) površinske prevleke /4/.
- a) Prvi pogoj za uspešno zaščito pred korozijo sta pravilna izbira materialov in oblikovanje konstrukcije, ki bo izpostavljena korozijskemu okolju. S takim ravnanjem lahko zmanjšamo škodljive posledice nekaterih oblik lokalnega korozijskega napada ali pa jih celo popolnoma preprečimo. Pri pravilni izbiri materialov si lahko pomagamo z empiričnimi podatki,



Slika 8. Jamice na površini bakra, nastale po polarizaciji v raztopini 0,1 M NaHCO_3 + 0,5 M Na_2SO_4 (a) in podaljšani polarizaciji v raztopini 0,1 M NaHCO_3 + 0,1 M Na_2SO_4 (b)

ki so v zvezi z vedenjem posameznih materialov v določenem okolju in so dostopni v priročnikih /2,9/. Tako bomo na primer v zmernih industrijskih atmosferah uporabili feritna nerjavna jekla, v industrijskih pa avstenitna. Pri izbiri upoštevamo tudi ceno materiala, njegovo predelovalnost, trdnost, zunanji videz in podobno. Pri načrtovanju konstrukcij se skušamo izogniti stiku dveh elektrokemijsko zelo različnih kovin, kar bi sicer pripeljalo do galvanske korozije. Pri izdelavi konstrukcij je pomembno, da se izognemo nastajanju mest, na katerih bodo ustvarjeni pogoji za lokalni korozijski napad (špranje, razpoke, "žepki", kjer ni pretoka tekočine). Že pri načrtovanju naj bi tudi predvideli uporabo katodne ali anodne zaščite ali pa zaščitnih prevlek.

b) Poznamo dve možnosti modifikacije elektrolita:

i) Odstranjevanje agresivnih komponent

vključuje odstranjevanje raztopljenega kisika v medijih, ki so v stiku z maloogljiknimi konstrukcijskimi jekli, na primer jeklene cevi v toplovodnih sistemih (za odstranjevanje kisika uporabljamo deaeracijo z N_2 ali Ar ali kemikalije za odstranjevanje kisika, npr. hidrazin ali natrijev sulfit), nevtralizacijo kislin, odstranjevanje raztopljenih soli (npr. z ionsko izmenjavo) in odstranjevanje vlage (z uporabo silikagela).

ii) Dodatek korozijskih inhibitorjev

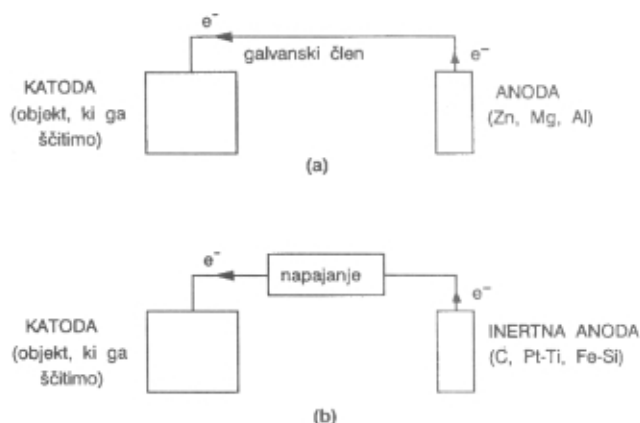
razširjena metoda zaščite kovin v kontaktu z vodnimi raztopinami, zlasti v zaprtih sistemih (npr. hladilni ali grelni sistemi). Inhibitorji so organske ali anorganske snovi, ki zmanjšujejo korozijo, ko jih v ustrezni koncentraciji dodamo raztopini. Poznamo več mehanizmov inhibicije. Velika skupina inhibitorjev deluje tako, da se adsorbirajo na površini kovine, kar povzroči zmanjšanje hitrosti anodne ali katodne reakcije ali pa obeh. Inhibitorji, ki vplivajo na proces raztapljanja kovine, vključujejo aromatske in alifatske amine in različne žveplove spojine. Fosforne, arzenove in kositrove spojine imajo večji učinek na reakcijo izločanja vodika.

Druga skupina inhibitorjev pospešuje tvorbo zaščitne plasti, ki preprečuje difuzijo kisika do površine kovine. Največ uporabljamo netopni cinkov in magnezijev hidroksid ali kalcijev in magnezijev karbonat.

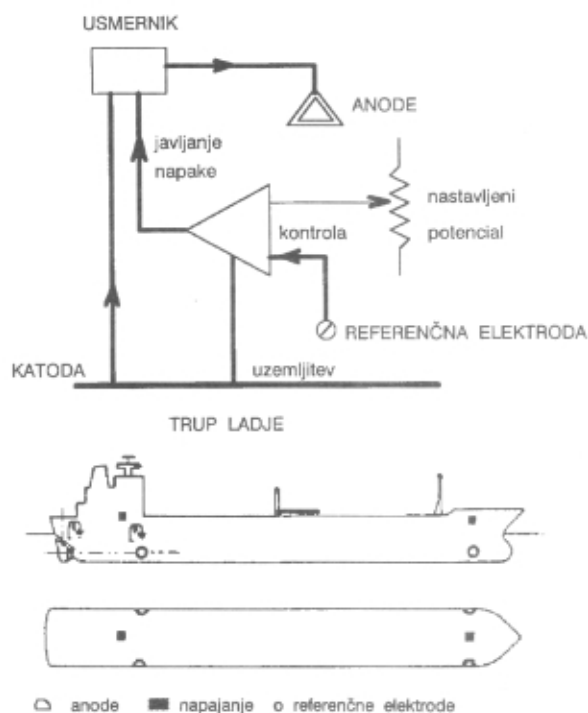
c) Ključ uspeha elektrokemijske zaščite proti koroziji je možnost spreminjanja potenciala na površini kovine. V principu je možno zmanjšati potencial na vrednost, ki je negativna glede na korozijski potencial, in tako postaviti kovino v stanje imunosti, slika 6. To je princip katodne zaščite. Po drugi strani lahko povečamo potencial tako, da se lahko vzpostavi stabilno pasivno stanje, kar je osnova anodne zaščite.

Katodno zaščito lahko ustvarimo z uporabo tako imenovanih "žrtvenih" anod, slika 9a /6/. Take anode so iz kovine, ki je elektrokemijsko bolj negativna glede na kovino, ki jo želimo zaščititi, in se bo zato hitreje raztapljala. Osnovna kovina je pri tem procesu katoda. Jasno je, da se pri takem procesu poveča

celotna izguba materiala, vendar na račun pomožne anode, medtem ko se raztapljanje osnovne kovine zmanjša. Zato take anode imenujemo "žrtvene". Običajno izdelujemo "žrtvene" anode iz cinka ali magnezija, čedalje več pa so v uporabi tudi anode iz aluminijevih zlitin. Drug način katodne zaščite je metoda dodatnega toka, slika 9b. V tem primeru potrebujemo vir napajanja. Na sliki 10 je podana



Slika 9. Princip katodne zaščite: (a) z "žrtveno" anodo in (b) metoda dodatnega toka



Slika 10. Električna shema pri metodi dodatnega toka (a) in shematičen prikaz razporeditve elektrod na trupu ladje (b)

električna shema, ki pojasnjuje princip te metode. V sistemu teče tok, katerega vrednost določimo z nastavljivo vrednostjo potenciala, ki jo izberemo tako, da bo sistem v stanju imunosti. Vrednost potenciala kontroliramo glede na referenčno elektrodo. Če pride do prevelikih sprememb potenciala, se tudi vrednost toka ustrezno poveča in tako povzroči prehod iz

prehod iz imunega stanja v področje korozije. Zato moramo potencial vzdrževati v ustreznih mejah, ki bodo zagotovile varno stanje kovine. Navadno uporabljamo inertne anode (npr. grafit, platinirani titan). Katodna zaščita je izredno učinkovita pri zaščiti ladijskih trupov, cevovodov, podzemnih rezervoarjev in podobno. Na sliki 10 je shematično prikazan princip katodne zaščite ladijskega trupa /6/.

Na podlagi termodinamičnih in kinetičnih podatkov je razvidno, da temelji uspešnost anodne zaščite na vzdrževanju stabilne pasivne plasti. Pri uporabi metode dodatnega toka se moramo zavedati, da mora biti pritisnjeni tok večji od kritičnega.

č) Površino kovine ali zlitine štiti prevleka, ki je bolj korozijsko odporna v določenem okolju. Na površini lahko tvorimo netopne pasivne prevleke (npr. s pasivacijo jekla v koncentrirani dušikovi (V) kislini in kasnejšim siliranjem, z anodizacijo aluminija, s fosfatiranjem). Kovino lahko zaščitimo tudi z laki, barvami ali pa s kovinskimi prevlekami.

V nadaljevanju bomo predstavili osnove korozije prevlek in nekaj rezultatov, ki so v zvezi s korozijskim vedenjem trdih prevlek, nanosenih na različne podlage.

2 KOROZIJA PREVLEK

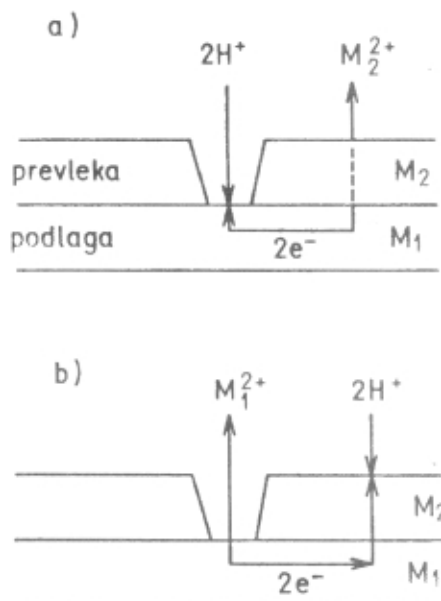
Splošno poznamo dva tipa sistema prevleka/podlaga:

- podlaga je elektrokemijsko bolj plemenita² od prevleke
- prevleka je elektrokemijsko bolj plemenita od podlage.

Shematično sta ta dva primera prikazana na sliki 11. Če je v primeru (a) prevleka neporozna, se anodno raztaplja (korodira), pri čemer je gostota korozijskega toka, kot merila za korozijo, določena s katodno reakcijo redukcije depolarizatorjev, kot sta H^+ ioni ali O_2 . Prevleka izkazuje enakomerno korozijo, hitrost le-te pa je sorazmerna gostoti toka raztapljanja. Ko je prevleka porozna, določa korozijsko vedenje narava galvanskega člana med prevleko in podlago. Ker je potencial prevleke bolj negativen od potenciala podlage, se bo prevleka raztapljala in bo tako podlaga katodno zaščitena, slika 11a. Zgled takega vedenja so prevleke iz cinka ali kadmija na železnih materialih.

Popolnoma drugačno korozijsko vedenje lahko pričakujemo, kadar je osnovna kovina zaščitena z bolj plemenito, vendar porozno prevleko, slika 11b. Zgled so porozne kromove prevleke na železu. Na celotni površini plemenite prevleke poteka katodna reakcija redukcije depolarizatorjev (H^+ ioni ali O_2). V porji prevleke je gostota anodnega toka mnogo večja od gostote katodnega toka, kar povzroča

intenzivno lokalno raztapljanje osnovne kovine skozi pore. Posledica tega procesa je jamičasti lokalni korozijski napad.



Slika 11. Shematičen prikaz korozijskega vedenja sistema kovina/prevleka: (a) podlaga je bolj plemenita od prevleke in (b) prevleka je bolj plemenita od podlage

2.1 Nekateri rezultati korozijskih raziskav na trdih zaščitnih prevlekah

Trde prevleke se uporabljajo v številnih triboloških aplikacijah, kot so rezilna in preoblikovalna orodja, ležaji in razni strojni deli. Uporabljajo se tudi v druge namene, kot na primer v mikroelektroniki za difuzijske zapore ali v medicini. V praksi so trde zaščitne prevleke pogosto izpostavljene agresivnim korozijskim medijem, ki lahko povzročijo spremembe na njihovi površini in tako tudi vplivajo na njihove zaščitne lastnosti. Zato je visoka korozijska odpornost trdih zaščitnih prevlek eden izmed pomembnih pogojev za njihovo uspešno delovanje.

Na potek procesa korozije prevlek vplivajo številni parametri, ki jih lahko razdelimo na notranje in zunanje. Notranji parametri so: fizikalne lastnosti prevleke, njena mikrostruktura in debelina, prisotnost mikrodefektov, vrsta uporabljene podlage in adhezijske lastnosti, medtem ko so zunanji: vrsta korozijskega medija, temperatura in prisotnost agresivnih ionov. Zaradi kompleksnosti problema, ki ga raziskujemo, je nujno poleg elektrokemijskih metod uporabiti tudi metode površinske analize.

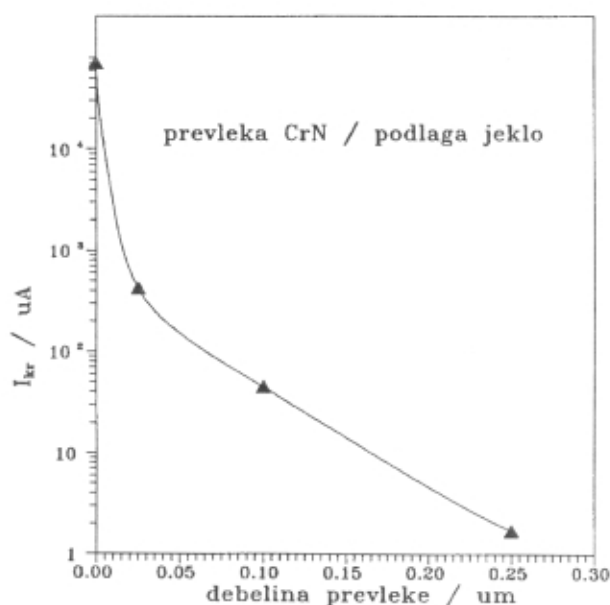
V sodelovanju z Odsekom za tanke plasti in površine Instituta "J. Stefan" smo se pred tremi leti začeli v našem laboratoriju ukvarjati s korozijskimi raziskavami prevlek. V nadaljevanju bomo predstavili nekatere izmed problemov, ki smo jih doslej raziskali na trdih nitridnih prevlekah (TiN, CrN) in zaščitnih

² bolj plemenita je tista kovina, katere potencial je bolj pozitiven v napetostni vrsti kovin

prevlekah (NiCr, NiCrTi). Poleg elektrokemijskih metod smo pri dosedanjih raziskavah uporabljali tudi Augerjevo elektronsko spektroskopijo, rentgensko fotoelektronsko spektroskopijo in vrstično elektronsko mikroskopijo.

2.1.1 Vpliv debeline prevleke na njeno mikroporoznost

Prevleke TiN in CrN so elektrokemijsko bolj plemenite od podlage, na katero so nanese, in je zato problem poroznosti izredno pomemben, slika 11. Splošno lahko mikroporoznost merimo z uporabo dokaj enostavnih metod, ki temeljijo: (a) na barvni reakciji ionov osnovne podlage v porah z indikatorjem (navadno reakcija med $K_3Fe(CN)_6$ in ioni Fe^{2+}), ki ga dodamo v raztopino ali z njim namočimo filterni papir; na mestih s porami se pojavijo barvni madeži, ali (b) na reakciji s plini, ki povzročijo vidne spremembe na površini prevleke (navadno amoniak ali žveplovodik). Poleg teh metod lahko uporabimo tudi elektrokemijsko metodo, in sicer multiciklično voltametrijo, kjer spremljamo vrednost kritičnega toka, slika 4, medtem ko vzorec zaporedno polariziramo v določenih mejah potenciala. Če je prevleka porozna in skozi pore prihaja do raztapljanja osnovne kovine, bomo to zaznali na krivuljah kot naraščanje kritičnega toka s številom ciklov. Čim večji je kritični tok, večje je raztapljanje osnovne podlage skozi pore. Na sliki 12 je podana odvisnost kritičnega toka, ki smo ga izmerili po dvajsetih zaporednih ciklih prevlek CrN, nanosenih za železno podlago, v odvisnosti od debeline prevleke /3/. Razvidno je, da se z večanjem debeline prevleke kritični tok zmanjšuje, kar je posledica zmanjšanja raztapljanja železa skozi prevleko. Če so prevleke

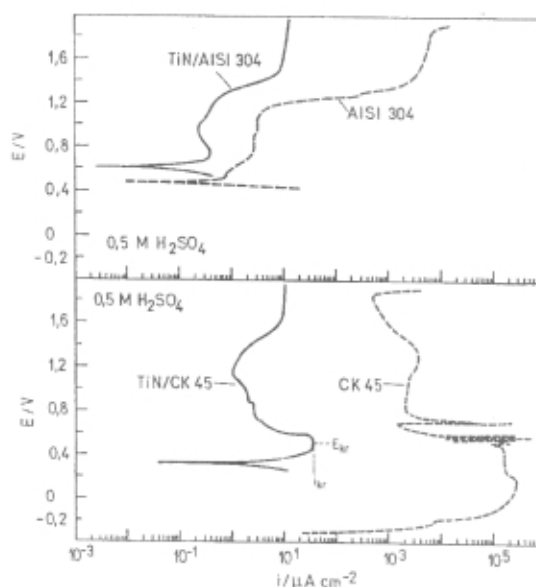


Slika 12. Odvisnost kritičnega toka od debeline prevleke CrN, nanese na jeklo za poboljšanje. Kritični tok je določen iz cikličnih voltamogramov, posnetih v acetatnem pufru, pH=5,6, pri čemer je bila hitrost spreminjanja potenciala s časom 20 mV s^{-1} .

CrN debelejšje od $1 \mu m$, raztapljanja podlage ne zaznamo več, kar pomeni, da je debelina prevleke zadostna, da prepreči ta proces.

2.1.2 Vpliv uporabljene podlage na korozijsko vedenje prevlek

Da bi lahko primerjali vedenje prevlek, nanosenih na različne podlage, je potrebno poznati korozijsko vedenje neprekritih podlag. Za nanos prevlek TiN smo uporabili dva tipa podlag: nerjavno jeklo (tip AISI 304) in jeklo za poboljšanje (tip CK 45). Slika 13 podaja potenciodinamični polarizacijski krivulji za ti dve podlagi v $0,5 \text{ M}$ žveplovni kislini /3/. Izredno visoka vrednost kritičnega toka za jeklo nakazuje njegovo močno korozijo v tem mediju. Kritični tok za nerjavno jeklo je manjši za pet velikostnih razredov. Njegova korozijska odpornost temelji na



Slika 13. Potenciodinamične polarizacijske krivulje za jeklo za poboljšanje (CK 45, neprekrto in prekrito s TiN) in nerjavno jeklo (AISI 304, neprekrto in prekrito s TiN). Krivulje so posnete v $0,5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$. Hitrost spreminjanja potenciala s časom je bila $0,5 \text{ mV s}^{-1}$.

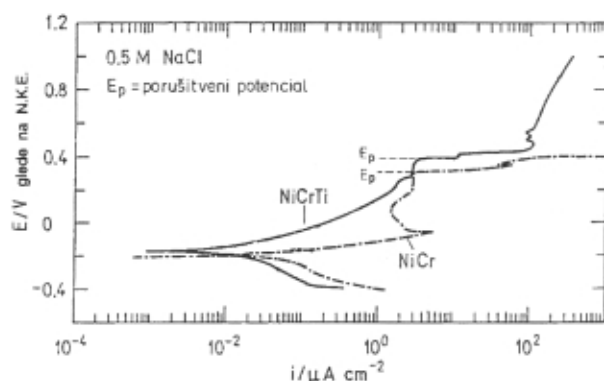
nastajanju zaščitne dvojne oksidne plasti, ki vsebuje notranjo plast, obogateno s kromom, in zunanjo, obogateno z železom /3/. Izboljšanje korozijskega vedenja podlag, prekritih s prevlekami TiN, se v obeh primerih izkazuje v zmanjšanju kritičnega toka in premiku kritičnega potenciala proti bolj pozitivnim vrednostim. Ko pa primerjamo polarizacijski krivulji za prevleki TiN, opazimo, da se med seboj zelo razlikujeta. Vrednost kritičnega toka je manjša za prevleko, nanese na nerjavno jeklo, kar nakazuje, da bodo v žveplovni kislini take prevleke bolj odporne v primerjavi s tistimi, nanesenimi na jeklo za poboljšanje.

2.1.3 Vpliv sestave prevleke na odpornost proti jamičasti koroziji

Raziskali smo vpliv prisotnosti dodatka titana v zaščitni prevleki NiCr na odpornost proti jamičasti koroziji v raztopini natrijevega klorida /10/. Na sliki 14 so podane potenciodinamične polarizacijske krivulje za prevleke NiCr in NiCrTi, ki potrjujejo izboljšanje korozijskega vedenja prevlek zaradi prisotnosti titana. V tem primeru prihaja do zmanjšanja kritičnega toka za en velikostni razred kot tudi do premika kritičnega potenciala proti bolj pozitivnim vrednostim (za 100 mV). Izredno pomembno v kloridnih raztopinah je, da prihaja tudi do premika porušitvenega potenciala, E_p . To je potencial, pri katerem začne tok nenadoma naraščati v pasivnem območju, kar nakazuje, da je prišlo do lokalnega preboja pasivne plasti in začetka jamičaste korozije. Splošno velja: čim bolj pozitiven je porušitveni potencial, tem boljša je odpornost proti jamičasti koroziji. Če je v prevleki titan, se porušitveni potencial premakne za približno 130 mV proti bolj pozitivnim vrednostim.

3 SKLEP

Trde prevleke, dobljene z metodami vakuumskega nanašanja, imajo čedalje večjo vlogo pri oplemenitjenju površin. Med trdimi prevlekami so bile doslej najbolj intenzivno študirane prevleke TiN, čeprav tudi drugi binarni nitridi ponujajo številne možnosti uporabe. Sedanje raziskave so usmerjene tako na nove materiale kot tudi na boljše razumevanje procesov, ki potekajo na površinah trdih prevlek. V mnogih aplikacijah so površine trdih prevlek izpostavljene korozijskemu napadu, ki ga pogosto spremljajo različni mehanizmi obrabe ter povišana temperatura. Ker pripelje korozijski napad do sprememb stanja površine in tako tudi negativno vpliva na njene zaščitne lastnosti, je študij korozijskih



Slika 14. Potenciodinamične polarizacijske krivulje za prevleke NiCr in NiCrTi, nanesene na nerjavno jeklo. Krivulje so posnete v 0,5 M NaCl, pri čemer je bila hitrost spreminjanja potenciala s časom 0,5 mV s⁻¹.

procesov izredno pomemben. Pri takem študiju so elektrokemijske metode nenadomestljive, saj omogočajo pridobivanje podatkov o mehanizmu in kinetiki korozijskega procesa, njegovi hitrosti, naravi korozijskih produktov in podobno. V prispevku so razloženi splošni principi korozijskih procesov, pri čemer je bil poudarek na koroziji trdih prevlek. Cilj raziskav, ki združujejo znanstvena področja nanašanja prevlek ("plazemsko površinsko inženirstvo" ³) ter področje korozije prevlek, je spoznavanje medsebojne odvisnosti parametrov procesa nanašanja in korozijskih lastnosti dobljenih prevlek. Ker so bile dosedanje raziskave uspešne, bodo imele podobne študije tudi v prihodnosti izredno pomembno mesto.

Tabela 1: Primerjava značilnosti splošnega in lokalnega korozijskega napada. Oznaka a je v zvezi z anodno reakcijo, oznaka k pa s katodno.

Lastnost	Splošna korozija	Lokalna korozija
Prostorska razporeditev anod. in kat. mest	niso ločena	ločena
Časovna razporeditev anod. in kat. mest	slučajnostne fluktuacije	konstantna
Relativna površina	$A_a = A_k$	$A_a \ll A_k$
Potencial	$E_a = E_k = E_{kor}$	$E_a < E_k$
Korozijski tok	$I_a = I_k = I_{kor}$	$I_a \gg I_k$
Narava korozijskih produktov	lahko so zaščitni	redko so zaščitni
Oblika napada	enakomeren	selektiven
Hitrost napada	konstantna	narašča s časom

4 LITERATURA

- /1/ H.H. Uhlig, R.W. Revie: "Corrosion and Corrosion Control", John Wiley & Sons, New York, Chichester (1985).
- /2/ "The Chemical Engineering Guide to Corrosion Control in the Process Industries", R.W. Green (editor), McGraw-Hill Publications Co., New York (1986).
- /3/ I. Milošev: "Korozijsko obnašanje trdih prevlek na bazi kroma in titana", Doktorska disertacija, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Univerza v Ljubljani (1993).
- /4/ I. Milošev: "Elektrokemijske lastnosti zlitine 90Cu-10Ni v alkalnih raztopinah", Magistrsko delo, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Univerza v Ljubljani (1991).
- /5/ M. Pourbaix: "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions", NACE, Cebelcor, Houston, Brussels (1974).
- /6/ D. Pletcher, F.C. Walsh: "Industrial Electrochemistry", Chapman and Hall, London, New York (1990).
- /7/ L. Vehovar: "Korozija kovin in korozijsko preizkušanje", samozal., Ljubljana (1991).
- /8/ I. Milošev, M. Metikoš-Huković, M. Drogowska, H. Menard, L. Brossard, J. Electrochem. Soc., 139, 2409 (1992).
- /9/ "DECHEMA Corrosion Handbook", VCH, Weinheim (1988).
- /10/ I. Milošev, B. Navinšek, Surf. Coat. Technol., 60, 545 (1993).

ZAPRTI MINI TEA CO₂ LASER ZA UPORABE V MERILNI TEHNIKI

Jožef Hozjan, Iskra Elektrooptika d.d., 61000 Ljubljana, Stegne 7

SEALED-OFF MINI TEA CO₂ LASER FOR METROLOGY APPLICATIONS

ABSTRACT

Sealed-off mini TEA CO₂ laser is presented which is suitable for metrological applications in IR techniques and optics, for laser rangefinders and for measurements in molecular spectroscopy. Sealed-off laser system makes possible autonomous and long life operation and its use in different measurement systems.

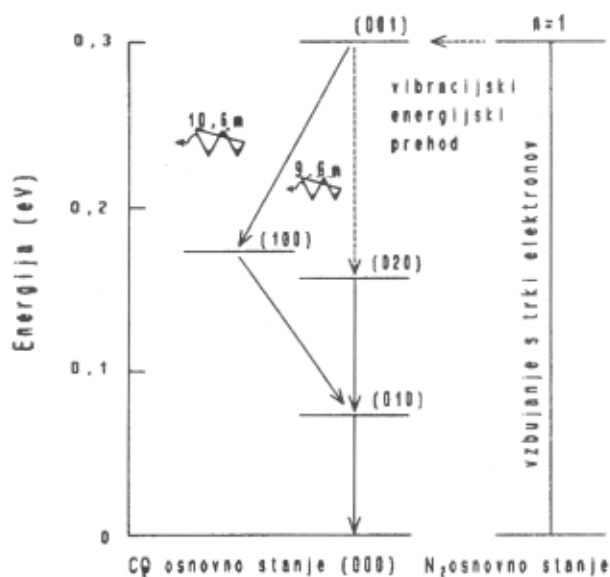
POVZETEK

Predstavljen je zaprti mini TEA CO₂ laserski izvir, primeren za uporabo v razdaljemerih, za meritve v IR tehniki in IR optiki in za meritve v molekularni spektroskopiji. Zaradi čim širše možne uporabe v različnih merilnih sistemih je plin v laserju zaprt in delovanje avtonomno in dolgotrajno.

CO₂ LASER

Tako kot vsi drugi, tudi CO₂ laserji porabljajo električno energijo in oddajajo manj moči v obliki sevanja. Ta laserska svetloba ima valovne dolžine okrog 10 mikrometrov. Razlika med vhodno in izhodno močjo je odvečna toplota, ki jo je potrebno odvesti. Za povečanje izhodne energije je potrebna večja vhodna energija, vendar tehnične in fizikalne ovire omejujejo količino vložene energije. Izbira načina hlajenja pomeni tudi izbiro določenega tipa laserja, kot so sistemi: zaprti, hitropretočni in pulzni.

CO₂ laser deluje z izmenjavo energije med nizko ležečimi vibracijsko-rotacijskimi energijskimi nivoji molekule CO₂ (slika 1). Molekule z višjim energijskim stanjem prehajajo s sevanjem v vibracijske energijske nivoje z nižjo energijo. Energijska razlika med zornimi in spodnjimi nivoji se konvertira v



Slika 1. Diagram energijskih nivojev CO₂ laserja

infrardeče sevanje. Zgornji nivoji so vzbujani z električno razelektritvijo iz osnovnega stanja ali z resonančnim prehodom z vibracijsko vzbujenega dušika. V obeh primerih je vhodna energija najmanj energija zgornjega nivoja. Po energijskem diagramu je maksimalni možni izkoristek 38%. To je le teoretična limita, ki je noben CO₂ laser ne doseže. Zelo dobro izgrajeni sistemi dosežejo maksimalno 20% vložene energije.

Laserski proces v CO₂ laserjih je občutljiv na temperaturo plinskih molekul v razelektritvi, to je v aktivnem sredstvu, kar dodatno zmanjšuje izkoristek. Večje vlaganje moči v plin dviguje njegovo temperaturo in s tem tudi termalno populacijo nižjega laserskega nivoja. Posledica je večja izguba sevanja zaradi apsorpcije v nižjih nivojih. V praksi se to opazi tako, da se z večanjem vložene energije najprej opazi naraščanje izhodne moči do določenega nivoja, ko temperatura plina doseže več kot 150°C, pa izhodna moč začne padati.

Zmožnosti sistema so torej v celoti odvisne od načina odvajanja odvečne toplote iz sistema. Za to obstajajo tri osnovne metode. Najenostavnejša je uporaba toplotno prevodnega plina. Škodljiva odvečna toplota se odvede na hlajene stene posode, v kateri se nahaja razelektritev. S tako metodo so hlajeni kontinuirni laserski sistemi z izhodno močjo 100 W ali manj. Pri drugi metodi plin sam odvaja svojo lastno toploto s hitrim pretakanjem. To so tako imenovani hitropretočni sistemi, ki delujejo v kilovatnem območju. Tretja metoda izkorišča prednost toplotne kapacitete aktivnega sredstva. Uporabna je v pulzних sistemih pri višjih tlakih. Maksimalna vložena energija, spet je omejena s temperaturo plina, je cca 300 J na liter laserskega plina pri atmosferskem tlaku. Izhodna energija je potem okrog 40 J. Obe, vhodna in izhodna energija, pa sta proporcionalni gostoti plina.

PULZNI SISTEMI

Problem odvečne toplote v pulzних sistemih rešuje torej toplotna kapaciteta samega aktivnega sredstva. Ker je toplotna kapaciteta proporcionalna gostoti aktivnega sredstva, je prav tako maksimalna izhodna energija v pulzu proporcionalna gostoti.

Trajanje pulza je v največji meri določeno z relaksacijskimi časi vzbujenih molekul. Ker ti časi postajajo krajši pri višjih tlakih, je dolžina laserskega pulza prav tako odvisna od tlaka plina. Rezultat tega je, da je izhodna moč v vrhu proporcionalna s kvadratom tlaka. Pri višjih tlakih laserskega plina se tako dosežejo laserski pulzi z večjo energijo, z večjo močjo in s krajšo dolžino. Za nižje tlake plina je normalna stabilna, uniformna razelektritev. Pri višjih

tlakah jo je veliko težje doseči. Ko tlak narašča, preide razelektritev pri cca 66 mbar iz uniformne v obliki sija ali žara v nekontrolirano iskrenje. Takšne razelektritve pa so nestabilne, nehomogene in neprimerne za učinkovito vzbujanje molekularnih laserjev.

Elektromagnetno polje v razelektritvi je določeno z ravnotežjem med energijo pospešenja elektronov v električnem polju in energijo, ki jo elektroni izgubijo s trki, zato je polje inverzno proporcionalno prosti poti elektronov, to je sorazmerno gostoti. Za aksialne sisteme to pomeni uporabo izredno visokih napetosti, kar je zelo nepraktično. Pri transversalno vzbujani razelektritvi, to je prečno na laserski žarek, so napetosti mnogo manjše. Prav tako je v tem primeru mnogo lažje ustvariti pogoje za stabilne razelektritve v siju ali žaru.

OSNOVNI PRINCIPI DELOVANJA TEA CO₂ LASERJA

O prvih transversalno ekscitiranih plinskih laserjih pri atmosferskem tlaku (od tod ime TEA) so poročali francoski in kanadski znanstveniki /1, 2/. Odkrili so tehniko, kako vzdrževati stabilne razelektritve v obliki žara v mešanici CO₂-N₂-He pri normalnem tlaku. Napredek v tehniki vzbujanja je vodil od primitivnih metod omejevanja toka z upori do zelo izpopolnjenih UV-predioniziranih razelektritev in tehnik z e(elektronskimi)-žarki. Izboljšane metode so prispevale k večji gostoti moči in k večji celotni izhodni moči iz velikih volumnov.

Osnovni parameter za procese v plazmi v kvazi-stacionarnem režimu je razmerje med električnim poljem E in gostoto plina N . Ta parameter E/N je različen za različno predionizirane sisteme (UV ali e-žarek). Osnovna razlika med dvema tehnikama je stopnja ionizacije, producirana z ionizacijskim izvirom. V UV-predioniziranih sistemih ima razelektritev na začetku nizko elektronsko gostoto ($10^4 < n < 10^8 \text{ cm}^{-3}$). V uporabljenem električnem polju se začetni elektroni pospešijo do energije, ki zadošča za nadaljnjo ionizacijo razelektritve. Vrednost E/N je torej zadosti visoka, da v razelektritvi poveča ionizacijski plaz, dokler ni dosežena kvazi-stacionarna elektronska gostota. To je takomenovana "samovzdrževana" razelektritev. V primeru tehnike z e-žarkom se ionizacija, ki naj vzdržuje razelektritev, producira z zunanjim elektronskim žarkom. Ta tehnika uporablja visokoenergijske elektrone (100-200 keV). Uporabljeno električno polje ali vrednost E/N je relativno majhno in praktično ne povzroča nadaljnje ionizacije, razelektritev ni "samovzdrževana". Velika prednost te tehnike je njena fleksibilnost in taka izbira električnega polja in plinske mešanice, da je izkoristek vzbujanja vibracijskih stanj z elektroni maksimalen. Prav tako je z njo možno realizirati velike sisteme pri multiatmosferskih tlakih. Pomankljivost e-žarkovne tehnike je cena in kompleksnost v primerjavi z UV sistemi. UV-predionizacija je zelo primerna za majhne sisteme.

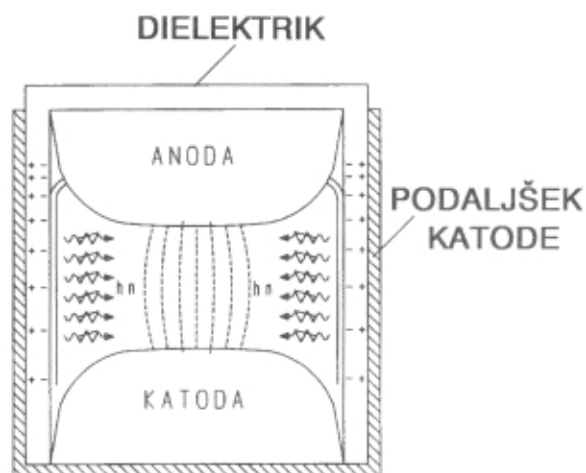
PREDIONIZACIJA

Predionizacija je torej del razelektritve in predhodnica glavne razelektritve. Potrebna je za produkcijo zadostnega števila nosilcev naboja, ki zagotovijo velik volumen glavne razelektritve v obliki žara in z veliko prostorsko uniformnostjo. Osnovna zahteva je, da zadostna gostota predioniziranih elektronov s prostorsko difuzijo tako imenovanih primarnih plazov zmanjša prostorski naboj ali polje gradientov do te mere, da pride do razelektritve v žar namesto v preboj. Minimalna zahtevana elektronska gostota za TEA lasersko razelektritev je $10^4/\text{cm}^3$. Če je predionizacijsko vezje počasno, to je induktivno, je potrebno glavno razelektritev zakasniti, dokler se ne vzpostavi zahtevana minimalna elektronska gostota.

V razvoju predionizacije za naš laserski sistem smo šli skozi več razvojnih faz, osnova vsem pa je UV-predionizacija. Naloga je bila razviti UV-predionizacijo z maksimalnim izkoristkom.

PREDIONIZACIJA S KORONO

Eksperimentiranje s predionizacijo je pokazalo, da je predionizacija s korono zelo učinkovita in konstrukcijsko manj zahtevna. Izraz korona se čisto nanaša na fenomen, ki nastane v plinskem mediju v okolici prevodnikov z majhnim radijem, ki so na visoki napetosti. Močno električno polje na včasih neuniformni površini povzroča parcialne razelektritve v plinu iz bližnje okolice. Podobno stanje se vzpostavi, ko je v močnem električnem polju plošča iz dielektrika. Polje dielektrično ploščo polarizira in na njeni površini se vzpostavi močno električno polje. To polje prav tako povzroča korono in s tem parcialne razelektritve v plinu v bližnji okolici dielektrika (slika 2).



Slika 2. UV predionizacija s korono

Slika 2 prikazuje presek laserskega prostora pravokotno na optično os. Oblika profila anode in katode omogoča uniformno porazdelitev električnega polja po njuni površini. V trenutku, ko iz električnega vezja pripelje na elektrodi viso-

konapetostni pulz, se med njima vzpostavi močno električno polje. Kovinski podaljšek s katode na vsaki strani obdaja dielektrični plošči, ki sta v direktnem stiku z anodo. Med delovanjem visokonapetostnega pulza sta oba dielektrika izpostavljena zelo močnemu električnemu polju. Postaneta polarizirana, kot prikazuje slika 2. Na ta način visoka napetost na površini dielektrika ustvarja površinsko razelektritev s korono.

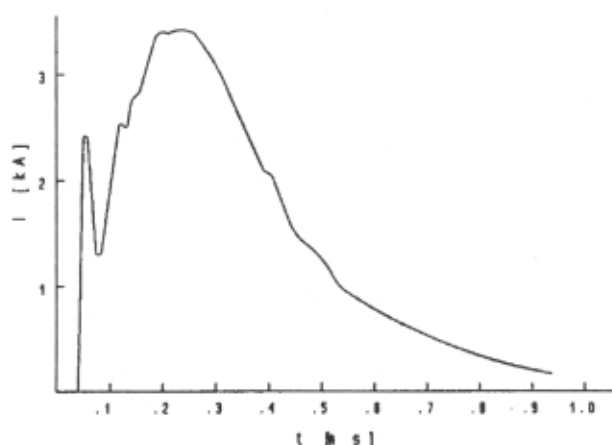
Tako formirane ione iz plina privlačijo dielektrične plošče, istočasno pa se formirajo tudi elektroni v plinski plasti ob dielektriku, še posebej pa v režu med dielektrikom in anodo. Ob zadostnem številu elektronov v plinu se pojavijo majhni tokovi, ki se hitro razvijajo v tokovne plazove. Zaradi neprevodnosti dielektrika je površinski naboj v smeri optične osi uniformen. Plazma, ki nastane v bližini dielektričnih plošč, formira kanal z dolžino elektrod in s tem glavno razelektritev - tok z anode na katodo.

Hitra sprememba toka zahteva napajalno vezje z nizko induktivnostjo, zaradi začetnega naraščanja toka

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U}{L} \quad (1)$$

kjer je U delovna napetost in L induktivnost vezja. Tok ne sme biti previsok. V primeru, ko je $U/L > 10^{10}$ V/H, sevanje, izhajajoče iz plazme, segreje in upari površino dielektrika ali na njegovo površino napari katodni material in ustvari prevodno plast. Za lasersko delovanje je ustrenejši režim razelektritve, ko je $U/L < 10^{10}$ V/H [3/].

Slika 3 prikazuje časovni potek oblike predionizacijske razelektritve s korono in glavne razelektritve za primer TEA CO₂ laserja.



Slika 3: Časovni potek predionizacije in glavne razelektritve

Prvi manjši tokovni pulz s trajanjem cca 25 ns pomeni predionizacijo. Ta tok je vsota površinskih tokov in premikalnega toka v dielektriku. Drugi pulz je glavna razelektritev. Optimalen sistem zahteva

primerno porazdelitev toka v oba pulza. Če predionizacijski tokovni pulz oddaja več svetlobe, kot je potrebno, je predionizacijska energija prevelika na račun glavne razelektritve, ki skrbi za vzbujanje laserja. Velikost toka v vsakem izmed pulzov je odvisna od več fizikalnih parametrov: dielektričnega materiala, dolžine dielektrika med anodo in katodo, debeline dielektrika, vrednosti V/L za vezje, tlaka in sestave plina. Za vsak laser te vrednosti določimo eksperimentalno.

Raziskava spektra korone v čistem CO₂ kaže zelo majhne intenzitete svetlobe [3/]. V primerjavi s tem vsebuje spekter korone v čistem N₂ znatno večjo intenziteto svetlobe v območju 100 do 200 nm. Merjenje absorpcije v CO₂ je pokazalo zelo močno absorpcijo svetlobe pod 115 nm. Ta potem pade na nekaj cm⁻¹ bar⁻¹ v 10 nm pasu, centriranem okrog 120 nm. Nad 120 nm absorpcija močno naraste, nato pe spet pade na 2 cm⁻¹ bar⁻¹ pri 160 nm in se zmanjšuje, dokler pri 195 nm ne pade na zanemarljive vrednosti [4/]. Torej samo fotoni v oknih 117nm <λ<124 nm in λ>160 nm lahko zadostno penetrirajo skozi CO₂. To je v skladu z ugotovitvami Kaminskega [3/], da so s CO₂ bogate mešanice slabo UV aktivne pod 155 nm v primerjavi s tistimi s koncentracijo CO₂ 10% ali manj. To je glavni razlog, zakaj s korono predionizirani CO₂ laserji dajo najboljše rezultate v plinskih mešanicah z nizko koncentracijo CO₂.

Za opisani laser smo razvili in izdelali koronski predionizator iz macorja (slika 4).



Slika 4. Koronski predionizator iz keramike macor

ELEKTRODE ZA HOMOGENO RAZELEKTRITEV

Za uniformno, homogeno razelektritev je poleg učinkovite predionizacije bistvenega pomena oblika elektrod za glavno razelektritev. Uniformna porazdelitev polja je pomembna za vlaganje čim večje energije in za širino razelektritve, ki mora biti primerljiva z razmikom med elektrodami, če naj bo ekstrakcija energije čim večja. Profil Rogowskega, v katerem so negladko povezani trije segmenti, ni najboljša rešitev:

$$y = \frac{\pi}{2} + ce^{-x}, \quad y = \frac{\pi}{2}, \quad y = \frac{\pi}{2} + ce^x \quad (2)$$

kjer sta x in y koordinati, ki opisujeta presek profila. Ti profili niso kompaktni in njihova uniformnost ni zanesljiva, ker so le empirična aproksimacija.

Analitično rešitev je predlagal Chang /5/. Predstavil je rešitev za uniformne elektrode s samo hiperboličnimi funkcijami. Formule omogočajo oblikovanje elektrod za vsak razmik s specifičirano uniformnostjo, izdelava pa je možna na numerično krmiljenem rezkalnem stroju. Predlagal je naslednjo konformno preslikavo:

$$\zeta = \omega + k \sinh \omega \quad (3)$$

kjer sta $\zeta = x+iy$ in $\omega = u+iv$, x in y sta prostorski koordinati profila elektrode, u je funkcija fluksa, v funkcija potenciala in $k > 0$. V ravnini ω je ekvipotencialna ravnina, dana s konstantno vrednostjo v in s spreminjanjem spremenljivke u . V ravnini ζ je odgovarjajoča ekvipotencialna površina v skladu s (3):

$$x = u + k \cos v \sinh u, \quad (4)$$

$$y = v + k \sin v \cosh u, \quad (5)$$

kjer je $|v| < \pi$. Videti je, da sta ti ekvipotencialni ravnini simetrični na os y , medtem ko sta ekvipotencialni ravnini za v in $-v$ zrcalni sliki.

Iz gornjih enačb se da izračunati oblika uniformnih elektrod za želeni volumen razelektivitve. V praksi je elektroda trodimenzionalna. Ker konformna transformacija direktno ne more generirati tridimenzionalnega profila, se zadovoljimo s sestavljenim profilom. Pri tem obravnavamo elektrodo, ki je dolga v z in ozka v x dimenziji. Profil yz v ravnini pri $x=0$ z maksimalno ravnim profilom polja se lahko izračuna tako, da se v gornjih enačbah in izračunu, ki jim sledi, x zamenja z z . To se izvede za vse vrednosti y vzdolž z osi.

V našem primeru je bil za elektrode izbran in izračunan Changov profil s karakterističnim faktorjem $k=0,07$. Ta faktor posredno določa geometrijsko širino elektrode, predvsem pa širino homogene razelektivitve. Izračun je bil narejen za volumen razelektivitve $10 \times 10 \times 100$ mm. Changov profil je uporabljen v prečni smeri elektrode in je konstanten po celi dolžini, ki prispeva k razelektivitvi. Preskusi so pokazali, da spreminjanje Changovega profila po dožini naše relativno kratke elektrode ne prispeva bistveno k uniformnosti polja. Na konceh je profil elektrode radialno zaključen.

Elektrode so bile izdelane na NC stroju s korakom (10/265)mm. Dolžina elektrode je bila 125, širina 25,4 in višina 10 mm. Potrebno gladkost smo dosegli z ročnim poliranjem.

PLINSKA MEŠANICA

Kot je že bilo rečeno, je plinska mešanica sestavljena iz plinov He, CO₂ in N₂. Laserski efekt dobimo pri prehodu molekule CO₂ iz stanja 001 v stanje 100

(slika 1). Selektivno vzbujanje zgornjega laserskega nivoja se izvrši z vibracijskimi nivoji molekule N₂ preko elektronskih trkov. Vzbujene molekule potem z resonančnim prehodom predajo energijo asimetričnemu 001 modusu molekule CO₂. Depopulacija spodnjega laserskega nivoja 100 se izvrši z resonančnim prehodom energije na vibracijski nivo 010 molekule CO₂, ki mu sledi relaksacija s trki He atomov. Helij torej skrbi za učinkovitejše vračanje molekul CO₂ v osnovno stanje in zaradi dobre toplotne prevodnosti posredno tudi za hlajenje plinske mešanice.

Eksperimentalno ugotovljena mešanica za opisani zaprti TEA CO₂ laser, predioniziran s korono, je He:CO₂:N₂ je 7:2:1. Ta mešanica se lahko med laserji za nekaj procentov razlikuje, zato jo je potrebno določiti za vsakega posebej.

KATALIZATOR

V razelektivitvi v plinski mešanici pride do disociacije molekul CO₂. Koncentracija plina CO₂ se zmanjša, poveča se koncentracija CO in O₂, kar začne vplivati na normalno delovanje laserja in zmanjšuje izhodno energijo. Prvotno razmerje se lahko vzpostavi z dovajanjem sveže mešanice, če je laser pretočen, ali z nekim mehanizmom, ki zagotavlja ponovno sintezo molekul CO₂, če je laser zaprt. Tak katalizator je lahko temperatura cca 850°C, ali drugi homogeni (dodatki H₂ in plina CO) in heterogeni dodatki. Najbolj pogosto se uporabljata katalizatorja Pt-SnO₂ in Pd-SnO₂ /6/, ki sta aktivna že pri -27°C.

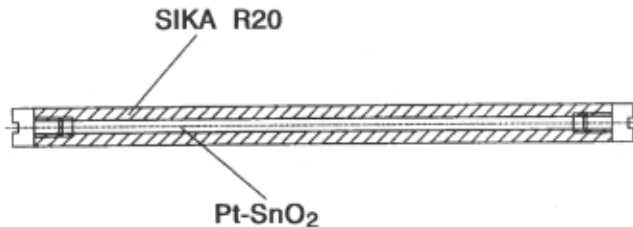
Molekule CO₂ v razelektivitvi vedno disociirajo, zato je obstojnost zaprtih CO₂ laserjev najbolj pogosto omejena z ireverzibilnimi kemijskimi procesi disociacijskih produktov, kot so CO, O in C, ter ujetjem molekul plina v katodi. Posledica je postopno zmanjševanje izhodne moči in energije. Dovajanje sveže mešanice zaprti sistem izključuje. Mehanizem, ki zagotavlja ponovno sintezo molekule CO₂, je primeren katalizator.

Za naše potrebe je bil na FNT Oddelku za kemijo razvit katalizator Pd-SnO₂. Izdelan in testiran je bil v obliki prahu. Njegova aktivnost je cca $1,2 \cdot 10^{-4}$ ls⁻¹g⁻¹ in je primerljiva s podatki iz literature. Aktivnost pomeni volumnsko črpalno hitrost katalizatorja za O₂ na enoto mase katalizatorja.

Ta oblika ni primerna za zaprti sistem laserja, zaradi raztresanja prahu po njegovi notranjosti. Prah povsem pokvari razelektivitvene karakteristike in reflektivnost zrcal. Velika energija laserskega sevanja znotraj optičnega resonatorja enostavno prisodi prah na zrcalih in jih tako uniči.

V zaprtem laserju je uporaben le katalizator v obliki delcev z velikostjo 50 mikrometrov in več, zaprt v porozno nerjavečo jekleno sintrano cev Sika R 20, ki prepušča le delce manjše od 20 mikrometrov (slika 5).

Potrebno količino katalizatorja v zaprtem laserju določimo z naslednjimi parametri:



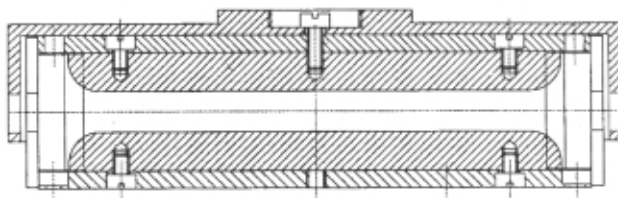
Slika 5. Porozna cev SIKA R 20, napolnjena s katalizatorjem Pd-SnO₂

$$NQ = p w A \quad (6)$$

kjer je N število strelav na sekundo, Q je količina O₂, ki se generira pri enem strelu, p je maksimalni dopustni parcialni tlak O₂, w je masa katalizatorja in A aktivnost katalizatorja.

RAZELEKTRITVENI MODUL

Po opisanih spoznanjih je bil konstruiran in izdelan prototip razelektritvenega modula za zaprti sistem TEA CO₂ laserja. Sestavljen je iz spodnje nosilne plošče za katodo in zgornje nosilne plošče za anodo, med njima sta keramična distančnika iz macorja, iz dveh glavnih razelektritvenih elektrod s Changovim profilom, iz predionizatorja iz keramike macor in dveh prevodnih plošč v direktnem stiku s katodo. Prikazuje ga slika 6.



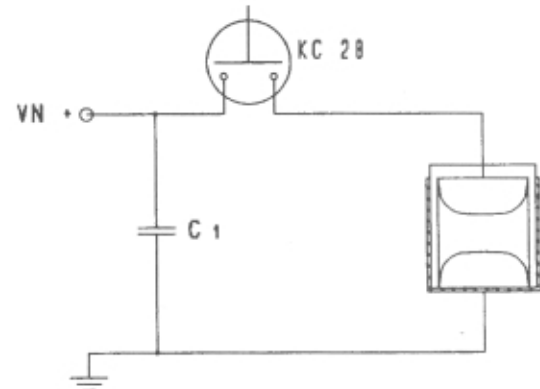
Slika 6. Razelektritveni modul

ELEKTRIČNO VEZJE ZA VZBUJANJE RAZELEKTRITVE

Osnovni princip napajanja TEA CO₂ laserja je tak, da se zaloga energije v visokonapetostnem kondenzatorju preko visokonapetostnega stikala izprazni v razelektritev v plinski mešanici. Poleg visokonapetostnega napajalnika potrebuje tak laser za vzbujanje vezje za formiranje laserskega pulza. Karakteristični za razelektritveno vezje za TEA CO₂ laser so nizka induktivnost, hitri napetostni in tokovni "rise time", visoka napetost in visoki tokovni pulzi nekaj kA. Eden od problemov pri oblikovanju takega vezja je zadovoljiti omenjene zahteve, ne da bi prišlo do preobremenjenosti glavnih komponent. Te komponente so: kondenzator za shranjevanje energije, stikalo (značilno je iskrišče, visokonapetostni rele ali tiratron) in glavne elektrode.

Vezje za napajanje laserja s polprevodniško in koronsko predionizacijo pa je dokaj enostavno (slika 7). Kot stikalo je uporabljen rele KC-28 firme Kilovac, ki se da preklapljati z nizko napetostjo.

Za potrebe napajanja TEA CO₂ laserja je bil razvit visokonapetostni kondenzator KLI 2125 KP, 12 nF, 25 kV v Iskri, Semič.



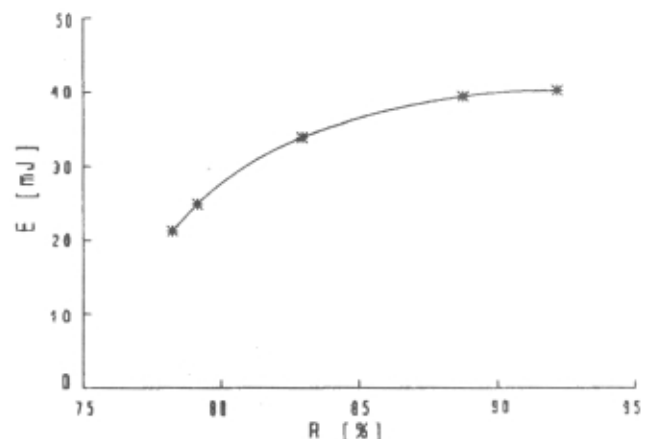
Slika 7. Napajalno vezje za TEA CO₂ laser s koronsko predionizacijo

VISOKONAPETOSTNI NAPAVALNIK

Visokonapetostni napajalnik je izveden v "switching" tehniki. Napajanje je baterijsko, 24 V. To napetost pretvori napajalnik v enosmerno napetost, nastavljivo od 10 do 25 kV. Njegova moč je 15 W, kar omogoča delovanje laserja z repeticijo 4 pulze na sekundo.

OPTIČNI REZONATOR

Resonator za obravnavani laser je sestavljen iz visokoreflektivnega Si zrcala z radijem 5 m in iz prepustnega ravnega zrcala iz Ge, katerega prepustnost smo določili eksperimentalno in je 88 % (slika 8) pri valovni dolžini 10,6 mikrometrov.



Slika 8. Odvisnost izhodne energije E od reflektivnosti R pri sestavi plinov He:CO₂:N₂=50:30:8; C₁=12,2 nF, U=18 kV

To je hemisferična konfiguracija. Nosilec resonatorja je kar ohišje laserja. Zrcali sta nameščeni na prečnih straneh ohišja v razdalji 205 mm.

ZAPRTO OHIŠJE LASERJA

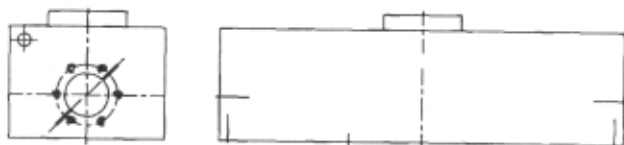
Izraz zaprti laser pomeni, da je njegovo delovanje, kar se tiče plina, avtonomno in ga ni treba dovajati od zunaj. Kot tak lahko deluje samostojno ali ga vgradimo v sistem. Za zaprti laser je potrebno primerno ohišje, ki trajno zadrži vse sestavne pline. To je še posebej pomembno za He, ki med vsemi plini najlaže uide.

Za ohišje so bile zato postavljene naslednje zahteve:

- Materiali za ohišje laserja in za laserski modul naj bodo čim bolj kemijsko inertni, da ne spreminjajo kemijske sestave plinske mešanice v laserju z lastnim odparevanjem ali s sintezo disociacijskih produktov laserskih plinov. Ker je laser zaprt, naj bodo vsi sestavni deli primerni za zahtevno čiščenje.
- ohišje mora biti tesno na He
- mehansko trdno in temperaturno malo raztežno, ker je istočasno nosilec optičnega laserskega resonatorja
- izvedba resonatorja mora omogočiti justiranje zrcal
- ohišje naj bo razstavljivo, plinska mešanica pa zamenljiva po preteku obstojnosti laserja.

Ohišje je sestavljeno iz dveh glavnih delov: osnovna plošča je obenem tudi nosilec laserskega razelektritvenega modula pokrov rabi kot nosilec resonatorja, nosilec VN skoznika za dovod visoke napetosti in priključne cevi za polnjenje laserja z mešanico plinov (slika 9).

Ohišje je izdelano iz nerjavečega jekla 4572, in je na razstavljivih mestih tesnjeno s vakuumskimi spoji CF in s tesnili iz bakra OFHC.



Slika 9. Pokrov ohišja laserja

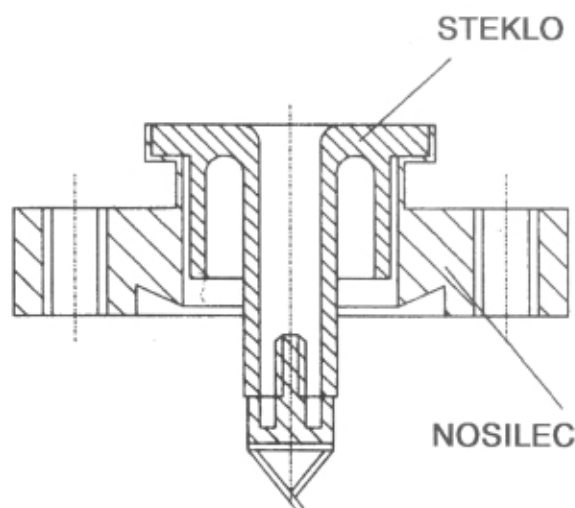
VAKUUMSKO TESNI SPOJI

Dolgotrajno, zanesljivo delovanje zaprtega laserja zagotavlja ohišje, ki se da dobro očistiti, je mehansko trdno, ustreza potrebnim klimomehanskim testom in se da vakuumsko tesno zapreti. To je, kot že rečeno, posebej važno zaradi prisotnosti He v plinski mešanici. Puščanje He v zanesljivem ohišju ne sme biti večje od 10^{-8} mbar l/s. Takšno ohišje je možno realizirati s kombinacijo zgoraj omenjenih izbranih materialov: primerne kovine, stekla in potrebne optike za laserski resonator. Za vakuumsko

tesno zapiranje ohišja so potrebni vakuumsko tesni spoji med naštetimi materiali in elementi laserja. V ta namen smo razvili naslednje spoje skupaj s pripomočki, določeno opremo in tehnologijo:

- (1) Var kovina-steklo za prenos energije iz visokonapetostnega kondenzatorja skozi kovinsko ohišje v razelektritveni modul

Ta spoj je uporabljen na dveh mestih na visokonapetostni prevodnici (slika 10). Na stekleni visokonapetostni izolator je na eni strani privarjen nosilec prevodnice, na drugi pa sama prevodnica.



Slika 10: Visokonapetostna prevodnica za 25 kV

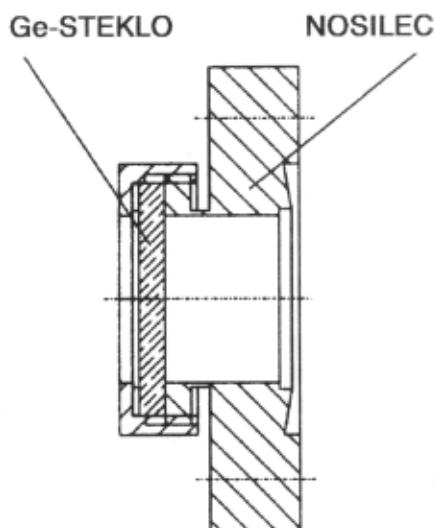
Spojna materiala milvar in steklo 8250 imata dobro prilagojen temperaturni raztezek. Tehnologija varjenja je dobro poznana v vakuumski tehniki. Vsak var nastane v induktivni zanki visokofrekvenčnega generatorja. Notranje napetosti je potrebno popustiti s kontroliranim ohlajanjem od 500°C navzdol v primerni peči.

- (2) indijev spoj germanijevega zrcala in kovinskega nosilca za izhodno zrcalo laserskega resonatorja

Razvili smo dva tipa In spoja. Prvi je visokotemperaturni. Ta zahteva polirani in pozlačeni kontaktni površini. Velja tako za nosilec iz jekla 4572 kot za Ge zrcalo. Kontaktno površino nosilca elektrolitsko pozlatimo v vodni raztopini $\text{KAu}(\text{CN})_2$. Sledi segrevanje nekaj ur na 300°C v vakuumu 10^{-5} mbar, zaradi desorpcije vlage iz zlate plasti [7]. Na kontaktni kolobar Ge zrcala naporimo primerno debelo plast Au. Med obe spajani površini vložimo obroček iz In s čistoto 99,99 %. Tako sestavljeni spoj segrevamo po časovno temperaturnem programu do 230°C in popustimo. Nastali evtektik je vakuumsko tesen in mehansko dobro veže obe spojeni površini. Odporen je na temperaturne šoke (pri testih na 77K) in na višje temperature do 300°C . Puščanje spoja je manjše kot ga zazna He detektor netesnosti z območjem $2 \cdot 10^{-10}$ mbar l s⁻¹. Ta spoj je posebej primeren za doseganje visokega

vakuuma, ko je potrebno vakuumsko napravo med črpanjem segreti na višjo temperaturo zaradi desorpcije vlage.

Drugi tip In spoja je hladni kompresijski spoj med nosilcem in zrcalom. Površina Ge zrcala je obdelana enako, vendar plast Au ni potrebna. Površina nosilca je fino postružena z obdelavo 4, in to v eni potezi, kot da je v površino vrezana fina spirala z majhnim korakom. Pri zapiranju med spajanca vložimo obroček iz čistega In in ju stisnemo s privijanjem matice (slika 11).



Slika 11. Kompresijski spoj z In

Pri tem je posebej važna čistoča, ki jo dosežemo z organskimi topili in jedkanjem In v HCl. Omenjeni spoj je temperaturno manj vzdržljiv, vendar povsem odgovarja zahtevam v območju od -40 do 125°C . Puščanje He je v območju 10^{-9} mbar l s $^{-1}$.

- (3) Indijev spoj bakra in kovinskega nosilca za visokoodbojno zrcalo

Tehnologija izdelave je enaka kot pri visokotemperaturnem spoju kovinskega nosilca in Ge zrcala.

- (4) Trdo spajkani spoj bakrene črpalne cevi z ohišjem iz nerjavečega jekla

Bakrena cevka se s trdo spajko iz Ag-Cu prispajka pri 750°C na ohišje laserja. Spoj je trden in zanesljiv glede puščanja.

- (5) Nestandardna oblika vakuumskega spoja CF za spoj med osnovno ploščo in pokrovom ohišja

Spoj sicer upošteva zakonitosti spoja CF, vendar je oblikovan po ohišju in zato odstopa od standardne cirkularne oblike. Tesnilo je iz bakra OFHC. Od vseh vakuumskih spojev na ohišju je ta, predvsem zaradi posebne oblike in seveda velikosti, najbolj kritičen.

Drugi vakuumski CF spoji ohišja z nosilci zrcal in visokonapetostne prevodnice so konstruirani po standardih. Tesnila so prav tako iz bakra OFHC.

- (6) Kompresijski spoj bakrene črpalne cevi - hladni var

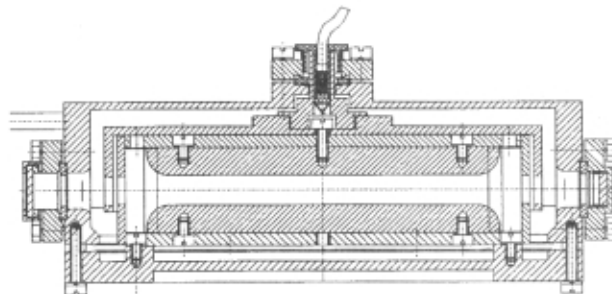
Ta spoj je v vakuumski tehniki elektronk in plinskih laserjev standarden. Izvedemo ga s stiskanjem kovinske stene cevi s posebnimi kleščami do mere, ko cev na stisnjenem delu razpade na dva dela. Vsi spoji so bili testirani na puščanje helija. To je bilo pri vseh manjše od 10^{-9} mbar l/s. Vsi so tudi vzdržali temperaturne teste od -30 do 120°C .

ZAPRTI TEA CO₂ LASER

Z opisanimi podsestavi in tehnologijo sestavljen zaprti TEA CO₂ laser prikazujeta sliki 12 in 13.

Proces zapiranja laserja je zaporedje določenih postopkov.

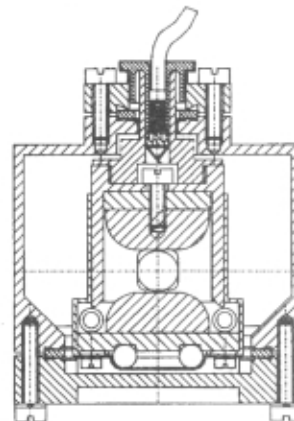
Sestavljenemu laserju se s pomočjo HeNe laserja najustira resonator. S helijevim detektorjem puščanja se preveri tesnost vseh spojev. Puščanje sme biti manjše od 10^{-8} mbar l/sek. Tako sestavljen laser



Slika 12. Vzdolžni presek TEA CO₂ laserja

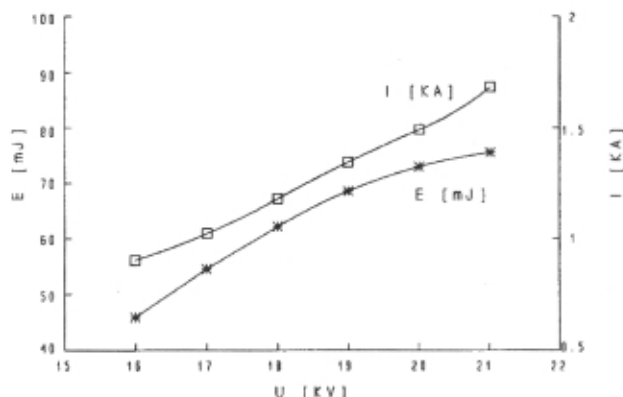
se nato izčrpa na 10^{-3} mbar in napolni z eksperimentalno določeno koncentracijo plinov ter zapre s kompresijskim spojem bakrene črpalne cevi.

Zaprt laser preko visokonapetostne prevodnice priključimo na vezje za formiranje pulza (slika 7) z visokonapetostnim napajalnikom in ga z vklapljanjem releja KC-28 prožimo.



Slika 13. Prečni prerez zaprtega mini TEA CO₂ laserja

Tako izdelanemu laserskemu sistemu nato z meritvami določimo optimalne pogoje delovanja. Nekateri soodvisnosti prikazuje slika 14.



Slika 14. Odvisnost izhodne energije E in toka I skozi razelektritev od napetosti

PRESKUS OBSTOJNOSTI

Obstojnost laserja smo preskusili z vsakodnevnim vključevanjem za 8 ur. Med preskusom je deloval s frekvenco 1 Hz. Test je trajal 500.000 strel in po njem ni bilo opazne spremembe izhodne energije. V času drugih testiranj in merenj je bilo opravljenih še dodatnih pol milijona strel. Izhodna moč se je znižala za cca 15 %. Ti podatki nam kažejo, da je obstojnost večja kot 10^6 strel.

Končni rezultat razvoja laserja je mini TEA CO₂ laser z naslednjimi karakteristikami:

- valovna dolžina 10,6 μm
- izhodna moč v pulzu 500 kW
- divergenca žarka 4 mrad

- premer izhodnega žarka 6 mm
- repeticija 2 pulz/s
- čas trajanja pulza 60 ns
- delovna napetost 19 kV
- kondenzator C₁ 12,2 nF
- obstojnost $>10^6$ strel
- dimenzije 215 x 67 x 71 mm

Laser s takimi lastnostmi je primeren za uporabo v merilni tehniki. V našem primeru smo ga uporabili v sistemu laserskega razdaljema.

SKLEP

Opisan je kompakten, v manjšem kovinskem ohišju zaprt TEA CO₂ laser s koronsko predionizacijo. S svojimi lastnostmi je primeren za uporabo v merilni tehniki. Uporabo takega laserja je z nadaljnjim razvojem in modifikacijami možno razširiti tudi na področje laserskih radarjev in lidarjev za globalno opazovanje vremena in podobno uporabo. Aplikativna vrednost predstavljenega laserskega izvira je bila preverjena v praksi v komercialno zanimivem prototipu CO₂ razdaljema (slika na naslovnici).

LITERATURA

- /1/ R. Dumachin, J. Rocca-Serra: *Compte R Acad. Sci.* 269, 216 (1969)
- /2/ A. J. Beaulieu: *Appl. Phys. Lett.* 16, 505 (1970)
- /3/ W. R. Kaminski, Corona Preionization Technique for carbon dioxide TEA lasers, Report No. 82R-980701-02, UTRC, West Palm Beach, FL (1982)
- /4/ R. V. Babcock, I. Liberman, W. D. Partlow, *IEEE j. QE-12*, (1976)
- /5/ T. Y. Chang, *Rev. Sci. Instrum.* 44, 275 (1984)
- /6/ D. S. Stark, M. R. Harris, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 16 (1983)
- /7/ Ichisa et al., *J. Appl. Phys.*, Vol. 59 (1986)

OBVESTILO

45. posvetovanje o metalurgiji in kovinskih gradivih, 2. posvetovanje o materialih in 14. slovensko vakuumsko posvetovanje, Portorož, 5-7 okt. 1994

Posvetovanja organizirajo: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Kemijski inštitut, Slovensko društvo za materiale, Slovensko kemijsko društvo: sekciji za polimere in keramiko in Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije.

Posvetovanja so namenjena predstavitvi raziskovalnih in razvojnih dosežkov s področja tehnologije in uporabe materialov. Obravnavana bodo naslednja področja:

- (a) sinteza sodobnih kovinskih, polimernih, keramičnih in kompozitnih materialov,
- (b) razvoj modernih tehnologij proizvodnje materialov,
- (c) korozija in propad gradiv,
- (d) sodobne termične obdelave,
- (e) karakterizacija materialov,
- (f) tanke plasti in površine,
- (g) vakuumsko tehnika in tehnologije,

- (h) tribologija,
- (i) matematično modeliranje in računalniška simulacija procesov in tehnologij,
- (j) ekologija in
- (k) kakovost.

Organizirana bo tudi razstava opreme in proizvodov s teh področij. Delovna jezika bosta slovenski in angleški. Zadnji rok za oddajo povzetkov je 30. april 1994.

Pošljite jih na naslov:

Organizacijski odbor Portorož 94,
Inštitut za kovinske materiale in tehnologije,
pp 431, 61001 Ljubljana,

kjer dobite tudi dodatne informacije
(tel: (061) 125 11 61, fax: (061) 213 780).

TRDE ZAŠČITNE PREVLEKE (II. del)

P. Panjan, B. Navinšek, A. Žabkar in A. Cvelbar, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

Hard protective coatings

ABSTRACT

In the second part of the article we describe the hardness and the adhesion of hard protective coatings. A detailed understanding of these properties and their technological importance are discussed.

POVZETEK

V drugem delu tega prispevka podrobneje obravnavamo trdoto in oprijemljivost (adhezijo) trdih zaščitnih prevlek in na kratko opisujemo njihov tehnološki pomen.

1 Uvod

V prejšnjem prispevku smo pokazali, da je velika trdota trdih zaščitnih prevlek, povezana s stopnjo kovalentnosti medatomske vezi. To trditev bomo v nadaljevanju podrobneje utemeljili. Ker merimo trdoto prevlek z metodo odtisa zelo trde konice, moramo pri interpretaciji rezultatov upoštevati tudi procese plastične deformacije. Na te procese pa odločilno vplivajo mikrostrukturne lastnosti plasti (tj. povprečna velikost kristalnih zrn, mikrorazpoke, struktura mej, tekstura), nečistoče v plasti in prisotnost metastabilnih struktur.

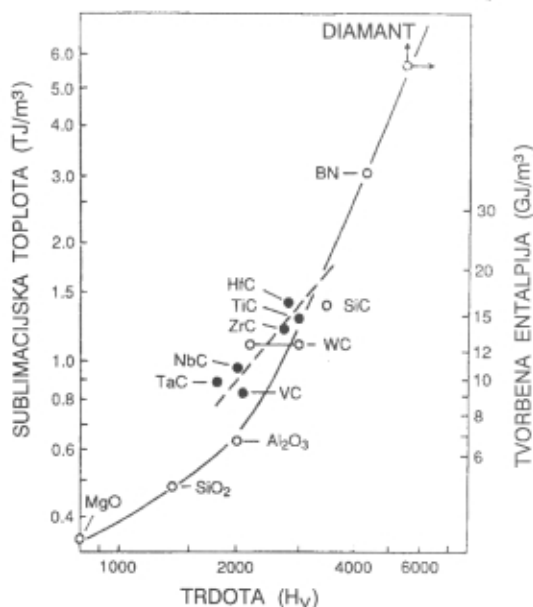
Merilo kvalitete in uporabnosti trdih prevlek je tudi njihova oprijemljivost na podlago. V nadaljevanju bomo zato podrobneje opisali mejo podlaga-prevleka in razložili kakšen je vpliv parametrov priprave prevleke na njeno oprijemljivost.

2 Trdota

Velika trdota je ena tistih lastnosti trdih zaščitnih prevlek, ki jo v praksi s pridom izkoriščamo. Od nje je odvisna obrabna odpornost materiala (orodja), vpliva pa tudi na trenje in mazanje /1/. Obrabo materialov, ki so v kontaktu (npr. orodje med rezanjem ali preoblikovanjem neke kovine) lahko zmanjšamo, če povečamo njihovo trdoto /1/. Obraba na enoto drsne poti je sorazmerna pritiskni sili in obratno sorazmerna trdoti površine. Do obrabe materiala pride, ker se le-ta na kontaktnih mestih elastično in plastično deformira zaradi mehanskih obremenitev. Če so lokalne mehanske in toplotne obremenitve večje od lomne trdnosti, potem se kontaktna površina poruši. Tako nastane izguba materiala, ki jo imenujemo obraba. Glede na vrsto trenja razlikujemo adhezijsko obrabo (na kontaktnih površinah pride do nastanka in takojšnjega rušenja adhezijskih vezi), abrazivno obrabo (nastane zaradi razenja trdih obrabnih delcev, ki pridejo med drsne površine), tribokemično obrabo (nastane zaradi kemičnih reakcij med mazalnim sredstvom oz. medijem, ki izpolnjuje okolico drsnega para, in drsnimi površinami) in obrabo zaradi utrujanja (utrujanje materiala nastane zaradi ciklične obremenitve drsne površine).

Trdota je kompleksna lastnost materialov in je odvisna od veliko spremenljivk, zato jo je s fizikalnega stališča težko definirati. Kot smo že v prejšnjem prispevku zapisali, obstaja zveza med trdoto materiala in stopnjo kovalentnosti medatomske vezi /2/. Stopnja kovalentnosti je tem

večja, čim bolj se orbitali sosednjih atomov prekrivata in čim bolj sta primerljivi energija in velikost teh orbital. Takšna vez je zelo usmerjena. V diamantu, ki je najtrši, obstajajo čiste kovalentne vezi, medtem ko v kubičnem borovem nitridu (c-BN), ki je drugi najtrši material, obstajajo tudi ionske vezi. Trde materiale lahko v splošnem modeliramo z globokim atomskim potencialom s strmimi stenami (kratki vezi). Merilo globine atomskega potenciala je kohezijska energija, ki pa ne pove nič o obliki potenciala (dosegu vezi). Če dolžino atomskih vezi upoštevamo v računu tako, da kohezijsko energijo delimo z molarim volumnom, potem je korelacija med to količino in trdoto materiala dobra (slika 1).



Slika 1. Zveza med trdoto in kohezijsko energijo na molarni volumen, ki je izražena kot sublimacijska toplota oz. kot tvorbeno entalpija /1/.

Navadno merimo trdoto tako, da s trdo konico naredimo odtis v materialu. Trdota, ki jo na tak način izmerimo, predstavlja torej odpornost materiala na lokalno plastično deformacijo. Le-ta pa je seveda odvisna od drsenja dislokacij. Postopek merjenja trdote je ekvivalenten lokaliziranemu tlačnemu testu, zato pričakujemo zvezo med trdoto (H) in mejo plastičnosti (σ_y). Pričakujemo, da bo enačba $H = 3\sigma_y$, ki velja le za masivne materiale, veljala tudi za tanke plasti oz. trde prevleke. Ker pa se meja plastičnosti σ_y za masivne materiale s temperaturo zmanjšuje (v metalurgiji to izkoriščamo pri postopkih mehanskega preoblikovanja kovin in zlitin), pričakujemo, da se bo tudi trdota trdih prevlek zmanjševala s temperaturo. Zveza med trdoto in temperaturo prevleke je zato naslednja: $H = H_0 e^{-aT}$, pri čemer sta konstanti H_0 in a določeni eksperimentalno.

Ker gre pri merjenju trdote za plastično deformacijo materiala, je izmerjena vrednost odvisna od strukture dislokacij in njihove interakcije z drugimi mikrostrukturnimi

elementi (meje kristalnih zrn, tekstura, vsebnost nečistoč, porazdelitev faz itd.). Mikrostrukturo plasti lahko kontroliramo s parametri priprave, kot so temperatura in hitrost nanašanja, vrsta podlage, obstreljevanje rastoče plasti z ioni iz plazme itd.

Za tanke plasti je značilna zelo majhna velikost kristalnih zrn (<100 nm). Pri spojinah z visokim tališčem (kot npr.: TiN, ZrN, CrN) je povprečna velikost kristalnih zrn v večini primerov samo okrog 5-10 nm. Razlog zato je temperatura nanašanja (-400°C), ki je veliko nižja od temperature njihovega tališča (-3000°C za TiN in ZrN). Iz teorije kovin je znano, da sta trdota in povprečna velikost kristalnih zrn povezani s ti. Hall-Petchevo zvezo: $H = H_0 + k d^{-1/2}$, kjer je H_0 trdota monokristala, d povprečna velikost kristalnih zrn in k konstanta materiala. Majhna velikost kristalnih zrn torej poveča trdoto materiala. Zapisana zveza dobro velja tudi za enofazne kovinske plasti s povprečno velikostjo kristalnih zrn okrog 20 nm. Ne velja pa za enofazne refraktorne spojine, saj so meritve pokazale, da trdota le-teh ni odvisna od velikosti kristalnih zrn. Tako so izmerjene vrednosti trdote trdih prevlek TiN s stehiometrično sestavo med 2000 in 3000 HV, medtem ko je trdota masivnega polikristalnega vzorca 2000 HV in monokristala z orientacijo (111) 2300 HV.

Več raziskovalcev je ugotovilo, da je trdota trdih prevlek TiN odvisna od prisotnosti praznin na mejah kristalnih zrn. Več jih je, manjša je trdota. Tudi mikrorazpoke in poroznost plasti škodljivo vplivajo na njeno trdoto. Zlasti velika hitrost nanašanja in visok delovni tlak povzročijo nastanek mikrostrukture z odprtimi strukturami in šibkimi mejami. Trdota prevleke se poveča, če povečamo temperaturo nanašanja, ker se zmanjša vsebnost defektov. Ko je temperatura dovolj visoka, da se oblikujejo močne meje, doseže trdota največjo vrednost. Pri nadaljnjem povečevanju temperature pa se trdota zmanjša, ker se poveča velikost kristalnih zrn.

Na trdoto prevleke vplivajo tudi metastabilne strukture v plasti. Metastabilnost pomeni vgrajevanje dušikovih ali ogljikovih atomov na intersticijska mesta in oblikovanje supersasičene trde raztopine. Pojav je zlasti izrazit pri PVD postopkih, kjer poteka nanašanje plasti v pogojih izrazitega termodinamičnega neravnovesja (nizka temperatura nanašanja, nasičen parni tlak, velika hitrost nanašanja). Vgrajevanje intersticijskih atomov na mrežna mesta povzroči distorzijo kristalne strukture, zaradi česar je gibanje dislokacij oteženo. Trdota plasti se zato poveča. Metastabilne faze so zamrznjene v plasti vse do 1/3 temperature tališča, tj. do približno 550-800°C.

Čeprav nanašamo trde prevleke v srednje visokem vakuumu, ali celo višjem, se v plast vgrajujejo atomi argona, ogljika, dušika in kisika, ki se nahajajo v preostali atmosferi, kakor tudi druge nečistoče, ki izhajajo iz stene vakuumske posode. Nečistoče se vgrajujejo na substitucijska ali intersticijska mesta in na meje kristalnih zrn. Kljub temu, da je celotna koncentracija nečistoč le nekaj at.%, je njihov vpliv na trdoto izrazit. Učinek je podoben, kot ga poznamo pri utrjevanju kovin z dodatki drugih elementov, gibljivost dislokacij se zmanjša, zato se trdota poveča.

Plasti, ki jih pripravimo s PVD in CVD postopki, so pogosto preferenčno orientirane (ravnine z nizkimi indeksi najpogostejše ležijo vzporedno s podlago). Če pripravimo plast z drugačno teksturo, potem se njena trdota lahko ali poveča ali zmanjša za faktor dva.

Mikrotrdoto merimo z metodo odtisa piramidne konice iz diamanta ali safirja. Navadno merimo trdoto po metodi Vickers (kot ob vrhu kvadratne piramide je 136°). Trdota po Vickersu (H_v) je izražena z razmerjem sile vtiskovanja

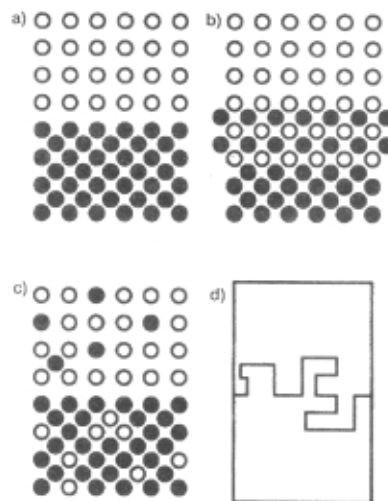
in velikostjo površine nastalega odtisa. Pri izbiri obtežitve konice moramo biti zelo pazljivi, ker lahko konica predre plast. Plastični deformaciji podlage, oz. vplivu podlage na izmerjeno vrednost trdote, se izognemo, če izberemo takšno obtežitev, da je globina odtisa štirikrat manjša od debeline plasti (sl.6). Obtežitve, ki jih navadno uporabimo pri merjenju trdote nekaj μm debelih trdih prevlek, so: 0.1, 0.25, 0.50 N.

3 Oprijemljivost (adhezija)

Dobra adhezija plasti je prvi pogoj za vsako nadaljnjo uporabo le-te, saj je prav meja med podlago in prevleko tisto mesto, kjer se najpogostejše pojavijo napake. Zato je podrobnejše poznavanje dogajanj na meji pomembno za napoved vedenja makrosistema.

Na mikroskopski ravni je adhezija plasti povezana z elektronskimi in kemijskimi interakcijami na meji plast-podlaga /1/. Odvisna je ne le od površinskih sil, ampak tudi od morfologije površine, kemijskih interakcij, difuzije in nukleacije plasti.

Kadar ni interakcije med atomi plasti in atomi podlage, je meja ostra (sl.2a); napetosti in defekti so omejeni na bližnje področje meje. Adhezija plasti je slaba; hrapavost podlage jo izboljša.



Slika 2. Shematski prikaz interakcij na meji podlaga/tanka plast

Trde prevleke rastejo na določenih mestih površine jekla epitaksijsko, to pomeni, da se struktura kristalnega zrna podlage nadaljuje v kristalno zrno prevleke (takšna mesta v podlagi so karbidni vključki) /3/.

Atomi plasti in podlage lahko na meji (na nekaj atomskih razdaljah) oblikujejo spojine (sl.2b). Takšna meja je pogosto zelo krhka, ker je nastajanje spojin povezano z volumskimi spremembami v plasti. Adhezija je v splošnem dobra, v kolikor je mejna plast tanka oz. slaba, če je le-ta debelejša.

O difuzijski meji (sl. 2c) govorimo, kadar se sestava po globini postopno spreminja. Prvi pogoj za nastanek take meje je topnost atomov obeh materialov. Difuzija na meji ponavadi izboljša adhezijo. Različna gibljivost obeh vrst atomov pa lahko povzroči nastanek praznin zaradi ti. Kirkendall-ovega efekta. Ta pojav oslabi mejo. Psevdufuzijska cona lahko nastane tudi med simultanim ob-

streljevanjem rastoče plasti z ioni, kar v praksi izkoriščamo za izboljšanje oprijemljivosti prevlek. Podlage (orodja) priključimo na negativno napetost (bias) od -100 do -200 V, ki pospeši ione (Ar^+ , N^+ , Me^+) iz plazme proti podlagi. Rastočo plast pa lahko obstreljujemo tudi z ioni iz ionskega izvira.

O ti. mehanski meji (sl.2d) govorimo, kadar tanko plast nanese na grobo površino podlage. V tem primeru delujejo nekatera mesta na površini podlage kot mehanska sidra, ki znatno izboljšajo adhezijo.

Za dobro adhezijo je zelo pomembna čista površina podlage /4/. Adsorbirane nečistoče in različni reakcijski produkti (npr. oksidi) ovirajo rast trde prevleke in predvsem zelo škodljivo vplivajo na oprijemljivost le-te. Absolutno čisto površino je zelo težko pripraviti, zato se v praksi zadovoljimo s **tehnološko čistimi površinami**. To so površine, na katerih je koncentracija nečistoč **največ nekaj procentov monoplasti**. Nečistoče odstranimo s površine orodja z:

- mehanskimi postopki čiščenja
- kemijskim jedkanjem
- s pregrevanjem v vakuumu in
- v zadnji fazi, to je tik pred nanosom prevleke, z ionskim oz. plazemskim jedkanjem.

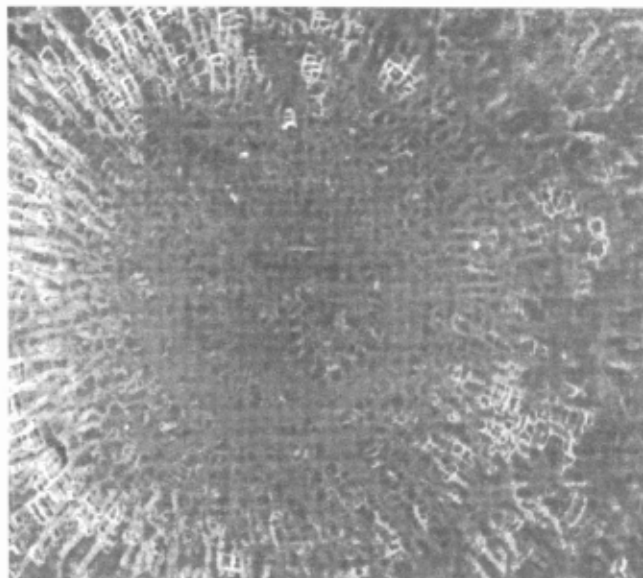
Oprijemljivost prevleke zelo izboljšamo, če na podlago najprej nanese tanko vmesno plast izbranega materiala - v primeru prevleke TiN je to kar tanka plast (100-200 nm) čistega titana. Pomen te vmesne plasti še ni povsem pojasnjen. Nekatere dosedanje raziskave so pokazale, da se pri temperaturi nanašanja (okrog 450°C) ogljik, ki difundira iz jekla, na površini veže s titanom in tvori titan-karbidna zrna, ki delujejo kot sidra /3/. Nekatere druge raziskave pa kažejo na to, da se oprijemljivost izboljša zaradi nastanka Fe-Ti intermetalnih spojin /5/.

Na oprijemljivost prevleke zelo vplivajo tudi mehanske napetosti (notranje in termične) /6/. Le-te so v nekaterih primerih tako velike, da plast razpoka ali celo odstopi s podlage. Napetosti naraščajo linearno z debelino plasti, zato je največja dopustna debelina npr. TiN in ZrN prevlek okrog 5 μm ; v prevlekah CrN so napetosti bistveno manjše, zato lahko pripravimo tudi 10 μm debele prevleke.

Metode, ki se v praksi uporabljajo za merjenje adhezije, so naslednje /1/:

- vlečenje (pull-off test)
- odstranjevanje plasti z lepilnim trakom (adhesive tape test) in
- razenje površine z diamantno konico (scratch test) in merjenje akustičnega odziva, ki se v trenutku, ko se plast pretrga zelo poveča.

Oprijemljivost lahko ocenimo tudi, če pri rockwelskem odtisu izmerimo obtežitev pri kateri prevleka v okolici odtisa razpoka (slika 3). V praksi adhezijo kvalitativno ocenimo tudi tako, da prekrito orodja damo v ultrazvočno kopel (npr. 20 kW); če je oprijemljivost prevleke slaba, potem le-ta zaradi ti. efekta kavitacije odstopi.



Slika 3. Rockwelski preizkus (krogelni odtis s silo 1000 N) v 3 μm debelo TiN prevleko, ki smo jo nanegli na podlago iz nerjavnega jekla /7/.

Izmerjene vrednosti adhezije se ne ujemajo povsem z dejansko adhezijo, ker k meritvi dodatno prispevajo: kemijske interakcije, interdifuzijski efekti, notranje napetosti, nečistoče na meji, nepopolnost kontakta itd.

4 Sklep

Trdota in oprijemljivost prevleke sta merili njene kvalitete in uporabnosti. Globlje poznavanje fizikalnega ozadja obeh je pomembno tako pri optimizaciji lastnosti prevlek, ki se danes uporabljajo v praksi, kot tudi pri razvoju novih.

5 Literatura

- /1/ M. Ohring, The materials science of thin films, Academic Press, 1992
- /2/ P. Panjan, B. Navinšek in A. Žabkar, Vakuumist 13/4 (1993) 22
- /3/ Physics and Chemistry of Protective Coatings, Ed. W.D. Sproul, J.E. Greene and J.A. Thornton, American Institute of Physics, Conf. Proc. N146, New York 1986, p.87
- /4/ P. Panjan, A. Cvelbar and B. Navinšek, Proc. of 21st Inter. Conf. on Microelec., Bled 1993, p.189
- /5/ D. Hanžel, W. Meisel, D. Hanžel, P. Griesbach, B. Navinšek, P. Panjan and P. Güttlich, J. Vac. Sci. Technol. A11(6), Nov/Dec 1993
- /6/ P. Panjan, B. Navinšek in A. Demšar, Vakuumist 27/2 (1992) 16
- /7/ B. Navinšek, Trde zaščitne prevleke, Institut Jožef Stefan, Ljubljana, 1993, st.29

Sodelovanje pri sinhrotronu

Na Institutu "Jožef Stefan" v Ljubljani je bil 7. marca ustanovni sestanek predstavnikov tistih inštitucij in posameznikov, ki se zanimajo za uporabo tržaškega sinhrotrona. Prijavilo se je že 23 raziskovalnih skupin, ki so predložile 38 predlogov za raziskave na morebitni

slovenski žarkovni liniji. Ustanovljena je bila ti. kolaboracija BOSS (Beam line of Slovenian Scientists), katere cilj je načrtovanje, zgraditev in uporaba takšne linije. Pomen sinhrotronske svetlobe je bil podrobno obravnavan v prejšnji številki Vakuumista.

ŠTUDIJ OZADJA V RAMANSKIH SPEKTRIH a-Si:H

M. Ivanda^a, D. Gracin^a, S. Lugomer^a, K. Furić^a in O. Gamulin^b

^aInstitut Ruđer Bošković, Odjel FEP, Zagreb, Hrvaška,

^bMedicinski fakultet, Odjel za fiziku i biofiziku, Zagreb, Hrvaška

Investigation of the broad background signal in Raman spectra of a-Si:H

ABSTRACT

The vibrational density of states in glassy materials is considerably larger than the Debye value. The so-called "boson peak" at low energies in the Raman scattering spectra is a manifestation of such "excess" modes. Here we present a systematic study of the broad background signal in Raman spectra of amorphous hydrogenated silicon (a-Si:H). This signal, which has the properties of the "boson peak", has not been observed up to now in any computer simulation of the phonon density of states and Raman spectra. The obtained depolarisation spectrum and spectral dependence of the signal shows the possibility of the Raman scattering on fractal structure. This is in accordance with existing theoretical consideration of the fractal growth of amorphous silicon. Here, for the explanation of the signal, we have applied the theory of Raman scattering on fractal structure. The theory has been proved consistent with the observed values. Only the small correlation length of the fractal $\sim 0,6$ nm seems confusing. This can be also explained by the fractal force constants, or rather by fractal structure of the energetic states of Si atoms in configuration space. Investigating the dependence on the carbon and the hydrogen concentration, we have shown that the intensity of the broad background signal increases much faster with the carbon than with the hydrogen concentration. In fractal interpretation this can be explained with the higher internal strain that can be caused by the substitutal bonding of the carbon atoms.

POVZETEK

Gostota fononskih stanj v steklastih materialih je veliko večja od vrednosti, ki bi jo pričakovali na osnovi Debyejevega modela. Ena od pojavnih oblik tega presežka vibracijskih stanj je ti. "bozonsko ozadje" v nizkofrekvenčnem delu ramanskega spektra. V tem delu bomo predstavili sistematično študijo ozadja v ramanskem spektru hidrogeniziranega amornega silicija (a-Si:H). To "bozonsko ozadje" ni bilo doslej opaženo še v nobeni računalniški simulaciji fononske gostote stanj in ramanskih spektrov. Dobljeni depolarizacijski spekter in frekvenčna odvisnost signala kažeta na možnost ramanskega sipanja na fraktalni strukturi, kar je v skladu z dosedanjimi teorijskimi raziskavami, ki dopuščajo možnost fraktalne rasti amornega silicija. Za razlago narave signala smo uporabili teorijo ramanskega sipanja na fraktalnih strukturah. Izkazalo se je, da je teorija v skladu z eksperimentalnimi vrednostmi. Le majhno korelacijsko dolžino fraktalov ($\sim 0,6$ nm) je težko pojasniti. Razložimo jo lahko s fraktalnostjo konstante sile oz. s fraktalno strukturo energijskih stanj Si atoma v konfiguracijskem prostoru. S študijem povezave koncentracije vezanega ogljika in vodika, smo ugotovili, da se intenziteta signala ozadja povečuje veliko hitreje s koncentracijo ogljika kot s koncentracijo vodika, kar po fraktalni interpretaciji lahko povežemo z relativno večjimi notranjimi deformacijami, ki jih povzroči vezava ogljika.

1 Uvod

Termične lastnosti stekla, epoksidnih lepil, krena poškodovanega z nevtroni itd., lahko razložimo /1/ s fraktonskimi vzbujenji nad frekvenco prehoda v fraktonsko stanje ω_{col} in fononskimi vzbujenji pod njo. Tudi ti. bozonsko ozadje v ramanskih spektrih številnih nekrista-

liničnih materialov je v tesni zvezi z njihovimi termičnimi lastnostmi /2,3/.

Razlage izvora bozonskega ozadja so si zelo nasprotujoče. Nemanich /4/ je analiziral lastnosti bozonskega ozadja, upoštevajoč model Martina in Breninga /5/, ki predvideva, da je maksimum intenzitete bozonskega ozadja v zvezi z maksimumom ti. konstante vezi $C(\omega)$. Model dobro opisuje nizkofrekvenčni ($\omega < \omega_{col}$), slabo pa visokofrekvenčni del spektra ($\omega > \omega_{col}$). Tudi depolarizacijski spekter močno odstopa od izmerjenega. Interpretacija bozonskega ozadja z maksimumom konstante vezi je vprašljiva zlasti pri merjenjih neelastičnega sipanja nevtronov /6/ in toplotne kapacitete nekaterih stekel. Iz primerjave rezultatov ramanskega in nevtronskega sipanja so Malinovski in sodel. /1/ pokazali, da bozonsko ozadje ne izhaja iz maksimuma konstante vezi $C(\omega)$, ampak iz presežka fononske gostote stanj, glede na Debyejevo fononsko gostoto stanj.

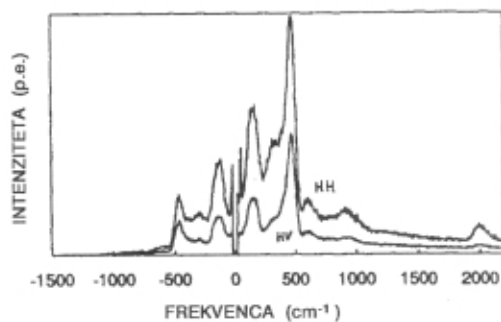
V amornih polprevodnikih ni bilo odkrito bozonsko ozadje v svoji značilni obliki. Zato se pogosto identificira s TA fononskim ozadjem. Pred kratkim smo pokazali /8/, da ima širok signal ozadja v ramanskih spektrih a-Si:H, ki se je sicer pripisoval rekombinaciji netermičnih elektronov na netermičnih vrzelih /9/, lastnosti, ki so značilne za bozonsko ozadje v steklih /2/. Iz temperaturne odvisnosti smo potrdili bozonski karakter ozadja in pokazali, da ga lahko uspešno opišemo z uporabo fraktalnega modela /10/. Obstaja več razlogov za pojav fraktalne strukture znotraj amornega silicija:

- (i) Večina a-Si:H tankih plasti se pripravi z nanašanjem pri nizkih temperaturah. Trdna faza v tem primeru ni v stanju najnižje energije, pa se zato lahko pojavijo fraktalni skupki v obliki polimernih verig ali dendritov /11/.
- (ii) Prisotnost vodika lahko poveča nukleacijo na tistih mestih, kjer se najpogosteje veže vodik (vodikovi skupki, polimerne verige itd.)

V a-Si:H obstajajo tudi eksperimentalno opaženi pojavi, ki jih je teoretijsko težko pojasniti z obstoječimi modeli. To so npr. disperzivni transport ali prehodni fototokovi /12/, velik padec "temnega" toka zaradi povečanja koncentracije vezanega vodika in linearna odvisnost energije elektronov od gostote elektronskih stanj /13/. McLeod in Card /14/ sta bila prva, ki sta te pojave pojasnila kvalitativno s fraktalnim modelom.

2 Rezultati merjenj in diskusija

Na sliki 1 sta prikazana Stokesova in anti-Stokesova HH in HV polarizirana in radiometrijsko korigirana Ramanova spektra. Očitno je, da sta vibracijski ozadji superponirani na širok signal ozadja. Nedavno smo pokazali, da ima signal ozadja bozonski karakter /10/. Če ta signal zmanjšamo za temperaturno odvisen bozonski faktor $(n(\omega)+1)$, dobimo spekter, ki je za komponento HV prikazan na sliki 2a. Da bi prilagodili teoretijsko krivuljo na širok signal ozadja, predpostavljamo zvezen prehod iz fononskega v fraktonsko področje ramanskega spektra.



Slika 1. Radiometrijsko korigirana HH in HV polarizirana ramanska spektra a-Si:H

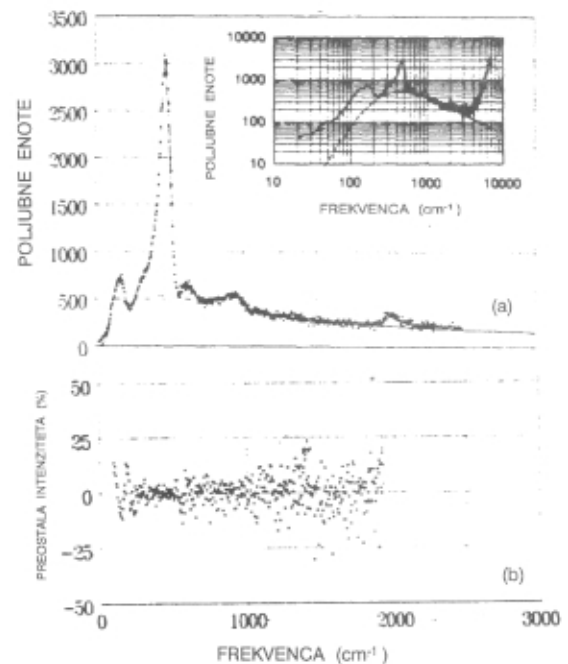
Ta predpostavka je skladna z meritvami Brillouinovega /15/ in nevtronskega /16/ sipanja na silikatnih aerogelih. Po rezultatih nedavnih raziskav Yakuboja in sodel. /17/ bi morala imeti zveza med ramanskim sipanjem na fononih in fraktonih naslednjo obliko:

$$I^h(\omega) \propto \omega^3 (\omega^2 + \omega_{col})^{d/D(\sigma+d-D)-\frac{5}{2}} \quad (1)$$

Prilagajanje ozadju znotraj ramanskih spektrov je bilo narejeno s PEAKFIT računalniškim programom, pri čemer so bili vsi parametri prilagajanja krivulje prosti. Slika 2 prikazuje rezultate prilagajanja na reduciranem in HV polariziranem ramanskem spektru. Preostala intenziteta spektra je glede na prilagojeno krivuljo v intervalu 10% (sl. 2b), kar potrjuje, da je bilo prilagajanje dobro izvedeno. Vrednosti intenzitete vrhov, frekvenca in širina Gaussovih krivulj, ki pokrivajo posamezna fononska ozadja, so dani nad sliko 2. Dobljeni parametri krivulje širokega ozadja, ki smo jih prilagajali skladno z relacijo (1), so: $\omega_{col}=245$ cm in $\tilde{d}/D(\sigma+d+D)=0,54$. Diagram, ki se nahaja zgoraj desno v sliki 2, prikazuje reduciran, HV polariziran ramanski spekter (polna črta) in prilagojeno krivuljo za signal ozadja (črtkana linija). Odstopanje signala od prilagojene krivulje v področju pod 50 cm je najverjetneje povezano z "kvazielastičnim" sipanjem, ki se sicer pojavlja v večini nekristaliničnih materialov.

Korelacijska dolžina, ki ustreza dani frekvenci prehoda, je $\xi = v/(\omega_{col} \cdot c)$, kjer je $v=4,4 \cdot 10^5$ cm/s povprečna hitrost zvoka v a-Si:H /18/, in c hitrost svetlobe. Na ta način je $\xi = 0,6$ mm, kar kaže na majhen prostorski doseg fraktalov v a-Si:H. Fraktalni eksponent je odvisen od faktorja skaliranja ter fraktalne in spektralne dimenzije. Faktor skaliranja je po računski simulaciji Stolla in sodel. $\sigma=1,1$. Izračunana vrednost za spektralno dimenzijo fraktalov v realnih sistemih, kjer prevladuje tenzorska elastičnost /19/, je $\tilde{d}=0,9$. Iz enačbe za fraktonski eksponent se lahko izračuna vrednost za dimenzijo fraktalov: $D=2,56$, kar je zelo blizu teoretični vrednosti: $D=2,5$ za "filtrsko mrežo" ("percolation network") /20/. Iz znane vrednosti razmerja $D/\tilde{d}=2,85$ lahko izračunamo frekvenco prehoda iz fraktonskega stanja v stanje delcev: $\omega_{col}=3300$ cm⁻¹, kar se odlično ujema z opaženim odstopanjem intenzitete ramanskega spektra od prilagojene krivulje, prikazane v diagramu v zgornjem desnem kotu slike 2.

Atomi vodika in ogljika se vežejo v kristalno mrežo amorfne silicija na različne načine. Vodik se v glavnem veže na nezasičene silicijeve vezi, s čimer se zmanjšajo

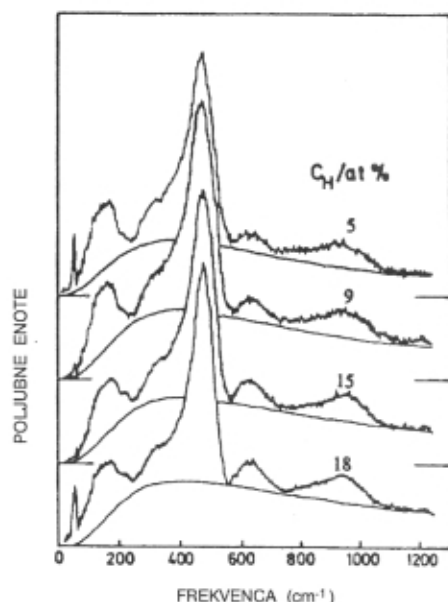


Slika 2. Reducirani, HV polarizirani ramanski spekter in prilagoditvena krivulja, ki ustreza fraktonskemu modelu. (a) Fononsko ozadje je prilagojeno z Gaussovo krivuljo, pri čemer so bili parametri intenzitete, frekvence in širine prosto izbrani. Diagram zgoraj desno pa prikazuje reduciran ramanski spekter (polna črta) in prilagojeno "bozonsko" ozadje (prekinjena črta). (b) Preostala intenziteta glede na prilagojeno krivuljo.

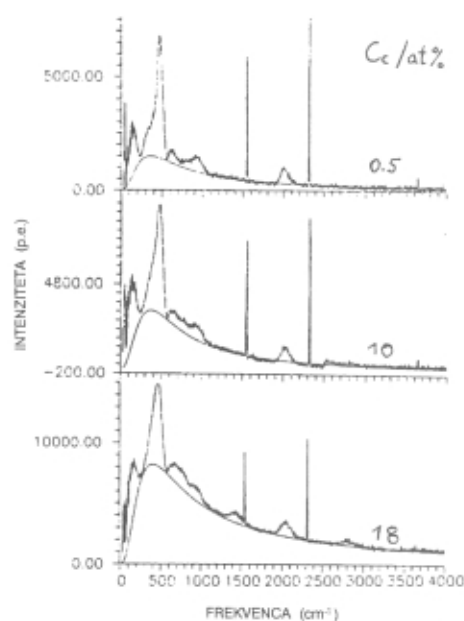
notranje deformacije. Ogljik se veže na substitucijska mrežna mesta, tj. zamenjuje Si atome v mrežnih vozliščih /21/, zaradi česar se notranje deformacije povečajo. Zato pričakujemo, da je vpliv ogljika na bozonsko ozadje nasproten vplivu vodika. To potrujeta sliki 3 in 4, kjer intenziteta bozonskega ozadja dramatično raste z koncentracijo ogljika (slika 4), medtem ko se s koncentracijo vodika ne spreminja (slika 3). Fraktalni skupki v amorfni strukturi so lahko povezani s področji lokalno povečanih notranjih deformacij. V našem primeru je to lahko v področju vrzeli Si atomov ali pa v okolici substitucijskih C atomov. V članku /22/ smo pokazali, da število vrzeli Si atomov raste počasneje s koncentracijo vodika, medtem ko se s koncentracijo ogljika dramatično povečajo, kar se ujema s povečevanjem intenzitete bozonskega ozadja in kar potrjuje našo predpostavko o povezanosti fraktalov s področji lokalnih notranjih deformacij.

3 Literatura

- /1/ S. Alexander, C. Learmans, R. Orbach in H.M. Rosenberg, Phys. Rev. B28, 4615 (1983).
- /2/ V.K. Malinovsky, V.N. Novikov, P.P. Parshin, A.P. Sokolov in M.G. Zemljanov, Europhys. Lett. 11, 43 (1990).
- /3/ S.R. Elliot, Europhys. Lett. 19, 201 (1992).
- /4/ R.J. Nemanich, Phys. Rev. B16, 1655 (1977).
- /5/ A.J. Martin in W. Brening, Phys. Status Solidi B64, 163 (1974).



Slika 3. Odvisnost "bozonskega" ozadja v odvisnosti od koncentracije atomov vodika



Slika 4. Odvisnost "bozonskega" ozadja v odvisnosti od koncentracije atomov ogljika

- /6/ U. Buchman, M. Prager, N. Nucker, Phys. Rev. B34, 5665 (1986).
- /7/ N. Ahmad, K.W. Hutt in W.A. Phillips, J. Phys. C: Solid State Phys. 19, 3765 (1986).
- /8/ M. Ivanda, K. Furić, O. Gamulin in D. Gracin, J. Non-Crystal. Solids 137-138, 103 (1991).
- /9/ I.H. Campbell, P.M. Fauchet, S.A. Lyon in R.J. Nemanich, Phys. Rev. B41, 9871 (1990).
- /10/ M. Ivanda, Phys. Rev. B46, 14893 (1992).
- /11/ R.F. Voss in M. Tankiewicz, J. Electrochem. Soc. 132, 371 (1985).
- /12/ J. Shirafuji in Y. Inushi, Amorphous Semiconductor Technologies and Devices, ured. Y. Hamakawa, Vol.6 (1983) p.47.
- /13/ W.B. Jackson, S.J. Oh, C.C. Tsai in J.W. Allen, Phys. Rev. Lett. 53, 1481 (1984).
- /14/ R.D. McLeod in H.C. Card, J. Non. Cryst. Solids 105, 17 (1988).

- /15/ E. Courtens, C. Lartigue, F. Mezeli, R. Vachter, G. Coddens, M. Foret, J. Pelous in T. Woignier, Z. Phys. B79, 1 (1990).
- /16/ R. Vacher, E. Courtens, G. Coddens, A. Heidemann, Y. Tsujimi, J. Pelous in M. Foret, Phys. Rev. 65, 1008 (1990).
- /17/ K. Yakubo, E. Courtens in T. Nakayama, Phys. Rev. B42, 1078 (1990).
- /18/ L.R. Testardi in J.J. Hauser, Solid State Commun. 21, 1039 (1977).
- /19/ I. Webmann in G.S. Grest, Phys. Rev. B31, 1689 (1985).
- /20/ S. Alexander in R. Orbach, J. Phys. (Paris) Lett. 43, L625 (1982).
- /21/ S. Lugomer, M. Ivanda, D. Gracin, K.F. urić in A. Maksimović, J. Mol. Struct. 267, 347 (1992).
- /22/ D. Gracin, M. Ivanda, S. Lugomer, U.V. Desnica in N. Radić, Appl. Surf. Science, v tisku.

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije objavlja

RAZPIS

za oblikovanje grafične podobe društva. Predmet razpisa sta oblikovanje emblema društva ter oblikovanje videza društvenih dokumentov. Pogoji razpisa so naslednji:

1. Razpis je anonimen, sodelujejo lahko vsi člani društva.
2. Poslani predlog naj vsebuje tiskani material v dveh izvodih (ne pošiljajte disket ali drugih pomnilniških medijev).
3. Grafična podoba naj bo zaradi nadaljne obdelave oblikovana z računalnikom oz. naj bo na voljo v enem od naslednjih formatov: DXF, EPS, HGL, BMP, DIB, WMF, TIF, JIF, JPG, GIF, PCX.

Predloge, označene s svojo šifro, pošljite na naslov društva do **5. maja 1994**. Najkvalitetnejši predlogi bodo predstavljeni v naslednji številki Vakuumista, da jih bodo ocenili in podali svoja mnenja tudi bralci. Sprejete predloge bo ocenjevala komisija, ki jo imenuje izvršni odbor društva, kriteriji bodo: izvirnost, vsebinska ustreznost in estetski videz.

Izbrani predlog bo nagrajen s 10.000,00 tolarji. Avtor izbranega predloga bo avtorstvo dokazoval z originalom predloga. Komisija si v primeru neustreznosti predlogov pridružuje pravico, da se do njih ne opredeli. Končni rezultati razpisa bodo objavljeni v 3. letošnji številki Vakuumista.

ZGODOVINA VAKUUMSKE TEHNIKE (III. del)

Stanislav Južnič*

The history of vacuum technique

ABSTRACT

Sources about the books, manuscripts and instruments concerning vacuum in the 18th-century Krain are published for the first time.

POVZETEK

Prvič objavljamo podatke o knjigah, rokopisih in napravah za vakuum na Kranjskem v 18.stoletju.

4) Pojmovanje vakuumu na Kranjskem v 18. stoletju

a) Erbergovo pojmovanje vakuumu, njegova zbirka učil iz leta 1754, njihova usoda in poznejše dopolnitve.

Bernhard Ferdinand Erberg (1718-1773) je bil profesor matematike in filozofije na liceju v Ljubljani med leti 1751 in 1758. Iz njegovih študijskih let se je ohranil nedatiran



Slika 1. Ljubljanski jezuitski kolegij z okolico (okrog 1660)

rokopis Fizeke, katere vsebina je predvsem fiziološka. Tekst je bil pozneje paginiran na vsaki drugi strani. Prvih 14. poglavij ni ohranjenih. 15. poglavje je obravnavalo zrak (str.1) in "horror vacui" (str. 2.a).

17.9.1755 je Erberg kot profesor matematike popisal 51 instrumentov, potrebnih za pouk matematike in fizike v Ljubljani (Müllner, 1901). Instrumenti niso bili oštevilčeni. 24, 26. in 29. instrument je zadeval vakuum.

24. instrument je bil Stannea pixis pro motu in vacuo. Domnevamo, da je bila to posoda z vodo, neprepustno zadelana s smolo. Posodo je bilo mogoče obrniti ali izčrpati tako, da je nastal vakuum.

26. instrument sta bili magdeburški polkrogli (Haemisphaera Magdeburgica). Popisani sta bili tudi leta 1811 med instrumenti za preučevanje hidrostatike in leta 1847 med instrumenti za preučevanje plinov. Nabavljeni naj bi bili med leti 1809 in 1845. Domnevamo, da so napravo iz leta 1754 nadomestili z novo, ki jo je izdelal ljubljanski mojster Samassa. Tako ni identična z napravo, enakega imena, nabavljeno leta 1755.

Stannea pixis pro motu in vacuo.
Marmora pro cohaesione.
Haemisphaeria Magdeburgica.
Fons Heronis aeneus.
Candelabra pro Antlia.
Barometrum pro observationibus Meteo

Slika 2. Izsek popisa instrumentov v jezuitskem kolegiju

V naslednjih letih so odpisali tudi Samassovi magdeburški polkrogli. Ne najdemo ju v popisu leta 1866. Tretji instrument z enakim imenom, vendar gotovo v sodobnejši izvedbi, so nabavili za gimnazijo v Ljubljani v šolskem letu 1867/68.

27. instrument je bila Heronova brizgalna iz bakra (Fons Heronis aeneus). V popisu leta 1811 jo je Kersnik med hidrostatičnimi instrumenti opisal kot "Fontaine". Najdemo jo tudi v popisu leta 1847. Izdelana je bila pred letom 1809. Izdelovalec ni znan. Za njo so popisali Heronovo kroglo, izdelek Fanzoya iz obdobja 1809-1845. Ta se je prav tako uporabljala za preučevanje plinov. Tako kot magdeburški polkrogli so tudi ta dva Heronova instrumenta odpisali pred letom 1866. Vendar v tem primeru niso nabavili novih.

29. instrument je bil barometer za meteorološka opazovanja, ki so ga bržkone uporabljali še leta 1811.

Leta 1811 je kemijski in fizikalni kabinet Janeza Kersnika (1783-1850) na Centralnih šolah v Ljubljani obsegal naslednje naprave za preučevanje vakuumu, popisane v kabinetu za kemijo:

– pihalna naprava iz jekla, po iznajdbi g. barona Zoisa z vsemi pripadajočimi premičnimi oporami

* Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehnične fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral pa leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani.



Slika 3. Licejsko poslopje v Ljubljani (zgradbo, ki je stala na Vodnikovem trgu (tržnica), so po potresu porušili). V njem sta bili še gimnazija in normalka.

- jekleni meh, pritrjen na ploščo s stojalom in cevmi
- dva aerometra
- veliki meh z dolgo cevjo in železno kontrapozo
- pnevmatska kad s svinčeno osnovo in dvojno svinčeno polico

Sledil je popis posod iz stekla in kristala:

- naprava za merjenje plinov pri (določanju) sestave vode iz velikega balona in dvema zvonovoma, s pipo iz medenine
- štirje stekleni valji za aerometer

Leseni pripomočki:

- pnevmatska kad, obkrožena z lesom
- manjša pnevmatska kad
- kad za shranjevanje plinov s pipo iz medenine in leseno oporo

Imeli so tudi naslednja orodja iz različnih snovi:

- mehurji s pipami iz medenine
- mehurji brez pip

V oddelku hidrostatika v kabinetu za fiziko in matematiko so popisali naslednje naprave:

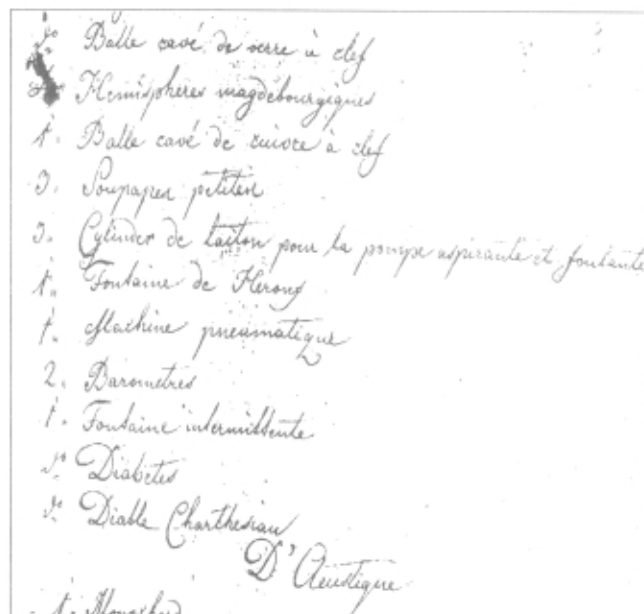
- votla steklena in bakrena krogla na ključ (Balle cave de verre/cuivre a clef)
- Magdeburški polkrogli
- trije zelo majhni ventili
- trije valji iz medenine za črpanje in polnjenje (Cylinder de laiton pour la pompe aspirante et foulante)
- Heronova brizgalka (Fontaine de Heron)
- pnevmatska mašina
- dva barometra (bržkone popisana leta 1847 pod številkami 109-111)

Leta 1847 je Kersnik popisal naslednje naprave, ki so zadevale vakuum:

številka 97: zračna tlačilka z vodoravnim škornjem, izdelek ljubljanskega mojstra Samasse, nabavljen pred letom 1809.

98. Zračna tlačilka z dvema navpičnima škornjema (izdelovalec Huck med leti 1809-1845)

99. Dve magdeburški polkrogli (Samassa 1809-1845)



Slika 4. Izsek iz popisa naprav v kabinetu za fiziko Ljubljanskega liceja (1811)

100. in 101. Dva zračno tesnjena in trije navadni stekleni recipienti (Sagarjeva tovarna stekla 1809-1845)

102. Barometrične cevi (Sagarjeva tovarna stekla 1809-1845)

109., 110., 111. in 113.: Barometri: na nateg z noniusom, potovalni z noniusom in Vestova barometrična cev vsi nabavljeni pred letom 1811. Dva barometra za vaje je izdelal Fanzoy med leti 1809 in 1845

114. Tlačilka (Kompression pumpe, Samassa 1809-1845)

106. Heronova krogla (Fanzoy 1809-1845)

107. Heronova brizgalna iz 18. stoletja

192. Papinov lonec (Hanaczik 1809-1845, toplota)

287. Parni mlin (Modeli in mašine, pred 1809)

288. Neskončni (Arhimedov) vijak (Modeli in mašine, pred letom 1809)

291. Tlačilka na vzvod (Hebelzug) (Modeli in mašine, pred letom 1809)

296. Tlačilka na poteg, izdelek Hessa in Tischlerja iz obdobja 1809-1845, popisana med Modeli in mašinami

Ne vemo zagotovo, kaj se je skrivalo za nazivi: Vestalsko sito in čarobni lijak, ki ga je izdelal Freyberger med leti 1809 in 1845. Prav tako ne vemo, za kaj so uporabljali "medeninast valj v lesu" (Hanaczik 1809-1845) in "kroglo iz medenine", nabavljeno pred letom 1809.

Leta 1866 je profesor fizike in ravnatelj gimnazije v Ljubljani Heinrich Mitteis (1822-1879) popisal naprave v fizikalnem kabinetu gimnazije v Ljubljani. Naslednja tabela vsebuje instrumente z vakuumom, za vakuum in za nadtlak po popisih Liceja in Gimnazije v Ljubljani med leti 1754 in 1866.

Med vsemi napravami, povezanimi z vakuumom, je bila s 147 fl in 157 fl 50 kr daleč najdražja Dvostranska zračna tlačilka, ki so jo nabavili leta 1858 in starejši model parnega stroja.

b) Cl. Mairani, De Causa variationum Barometri, Ljubljana 1760

Kot dodatek svojim izpitnim tezam iz leta 1760 je profesor fizike na liceju v Ljubljani Inocents Tauferer (1722-1794) objavil še razpravo Cl. Mairana o vzroku sprememb v barometru in javno branjeno razpravo Škofjeločana Alojzija

Vermatija (Vermesfelda) o gibanju zvezd po Kopernikovem sistemu.

Cl. Mairan je bržkone identičen de Mairanu. Nemški prevod njegove knjige o ledu so leta 1758 nabavili na liceju v Ljubljani (NUK 8535).

naziv naprave	leto nabave	leto popisa (z evid.št.)	leto odpisa	izdelovalec	cena (fl:kr)
Barometri:					
- potovalni noniusom	1809-45	1847(110), 1866	?	Hanaczik	28:35
- potovalni po Saussurju	1809-45	1847(?), 1866	?		12:60
- kovinski Burdonov	1865	1866			40:0
- na nateg z noniusom	pred 1809	1847 (109)	?	?	?
- na nateg z termometrom in noniusom	1861				36:0
- barometriška cev	1809-45	1847 (111), 1866		Vest	5:77
- dva barometra za vaje	1809-45	1847(113)	pred 1867	Fanzoy	?
Aerometri:					
- atmo(sfero)meter iz železne pločevine	1809-45	1847 (355)	pred 1866	Freyberger	?
- Nicolsonov iz medenine	1809-45	1847, 1866	?	Riebler	1:57
- Meisnerjev, s stekleno cevjo in stojalom,	1809-45	1847, 1866	?	Hanaczik	42:0
- Mohsov iz medenine	1809-45	1847, 1866	?	Hanaczik	2:10
- Beaumov iz medenine	1809-45	1847, 1866	?	Hanaczik	1:5
- Beaumov stekleni	1809-45	1847	pred 1866,	Hanaczik	?
- leseni	1809-45	1847	pred 1866,	Hanaczik	?
- srebrni in bakreni	1809-45	1847	pred 1866,	Hanaczik	?
Recipienti:					
- dva zračno tesnjena	1809-45	1847(100)	?	Samassa	?
- tri navadna steklena	1809-45	1847(100)	?	Samassa	?
Modeli parnih strojev:					
- navadni	pred 1809	1847 (287?), 1867	?	?	157:50
- Wattov	1867				15:0
Tlačilke:					
- zračna, z vodoravnim škornjem	pred 1809	1847(97)	pred 1866,	Samassa	?
- zračna, z dvema navpičnima škornjema	1809-45	1847(98)	pred 1866,	Huck	?
- dvostranska zračna	1858	1866	?	?	147:0
- na vzvod (model)	1858	1866	?	?	8:40
- na tlak (model)	1858	1866	?	?	8:40
- na tlak in vlek	1809-45	1847	pred 1866	Samassa	?
- zračna puška s tlačilko	1809-45	1847(114)	pred 1866	Samassa	?
- Realschova vodna	1809-45	1847	pred 1866	Hanaczik	?
- pnevmatska	1809-45	1847, 1867	pred 1866,	Hanaczik	4:20
- na vzvod	pred 1809	1847(291)	pred 1867	?	?
- na poteg	1809-45	1847(296), 1867	?	Hess in Tischler	
Gibanje v praznem:					
- tolmun zatesnjen s smolo za gibanje v vakuumu	1754	1754	pred 1811	?	?
- valj za demonstracijo padanja v vakuumu	1809-45	1847(122), 1866	?	Hanaczik	5:25
- Geisslerjeve cevi s stojalom	1863	1867(elektrika)		?	12:80
- fluorescentne cevi	pred 1845	1867(elektrika)	?	?	7:0
Druga orodja:					
- Mariottov poskus	1809-45	1847(125), 1866	?	Hanaczik	7:35
- Papinov lonec	1809-45	1847(192), 1867	?	Hanaczik	14:70
- Heronova krogla(?)	1809-45	1847(106)	?	Fanzoy	?
- Heronova brizgalka	1754	1811, 1847(107)	pred 1867	?	?
- 2 magdeburški polkrogli	1754, 1809, 1868	1811, 1847(99)		Samassa	?
- neskončni Arhimedov vijak	pred 1809	1847(288), Mašine)	?	?	?

Trinajst strani Mairanove razprave o barometru zadeva predvsem meteorologijo. Le na prvi strani opiše delovanje barometra, vakuumu v njem in zračnega tlaka (Kovačič, 1993)

DISSERTATIO CL. MAIRANI

De Causa variationum Barometri.

§. I. **M** Inimè adducor, ut credam, superesse etiamnum Phisicos, qui Principia, aeris gravitatem in dubium revocent; nec consentiant, quæ in tractatam duntaxat esse causam, per quam mercurius in barometris rubulo in 27. aut 28. pollicum altitudine supra ejusdem in pyxide stagnantis superficiem sustentetur. Ex elementis porro staticæ perspicuum est, æquilibrium fluidorum, eorumque gravitationis in bases, quibus incumbunt, unice dependere ex altitudine perpendiculari columnarum, quibus vires suas exerunt; amplitudinem vero & inæqualitatem earundem huc nihil prorsus conferre. Ex his principiis, quæ nota omnibus; & constructione simplicis barometri, quam æque ignotam nemini suppono, sequitur:

Primo: quod mercurius in tubulo contentus semper sit in æquilibrio cum aere, qui superficiem stagnantis in pyxide, aut vasculo mercurii incumbit.

Secundo: quod actio seu gravitas aeris in hanc superficiem eadem sit, quæ foret, si collum pyxididis aut vasculi, per quod ad mercurium stagnantem aer admittitur, produceretur in tubum ad ipsam æque atmosphæricam superficiem pertingentem: quo factò barometrum tubo recurvo affimilaretur, in cuius hoc novo producto brachio contentus mercurius semper in æquilibrio foret cum columna mercurii in altero tubo, qui alias adhibetur, contento.

Tertio: quod, si mutatio aliquæ gravitatis columnæ aerem seu ob audiam diminuatque ejus materiam, seu motum, aliamve quamcumque demum causam accedat, altitudo quoque major minorve futura sit, prout columna aërea gravior aut levior fuerit.

§. II. Ego sane non video, quo pacto causa quævis alia altitudinem nem columnæ mercurii tam notabiliter mutare possit, si tubus barometris, in quo suspensus est, aptissime clausus, & ab aere vacuum perferret. Quæ si forte, variationes enim, quas calor aut frigus causare possent, nullius sunt considerationis; cum in climata, quæ Parisiense est, summa ab hyeme ad æstatem usque in pondere ejusdem voluminis mercurialis differentia $\frac{1}{15}$ tantum observetur, quod nunquam amplius, quam tribus circiter lineis ab hyeme æstati me ad altitudinem mercurii deprimeret; in mutationibus vero frigus ac calor, quæ ordinario a die una in aliam contingunt, depresso hæc multo minor etiam unica linea foret. Quoniam vero indebitatem est, altitudinem barometri in Galis duobus circiter digitis per anni decursum, & aliquando minor etiam quam unius diei spatio digito prope uno mutari, facile est intelligere, folas, quæ in aeris gravitate eveniunt, mutationem causam & proximam & immoventem esse variationum

Slika 5. Naslovna stran razprave Cl. Mariana o vzroku sprememb v barometru

c) J. Schoettlovo pojmovanje vakuumu po Raigersfeldovih (Rakovčevih) zapiskih iz leta 1763

Mihael Amadej Janez Nepomuk Raigersfeld (Rako-vec) (1744-1783) je med leti 1761 in 1767 študiral pravo in kameralistiko pri Sonnenfelsu na Dunaju, ki ga je imel za svojega najbolj nadarjenega študenta (SBL). Leta 1763 je študiral na Terezijanski akademiji na Dunaju. Tam je predavanja fizike nekdanjega ljubljanskega profesorja Janeza Schoettla po učbeniku Paula Maka iz Bude zapisoval v knjigo, ki je ohranjena še danes.

Strani 4-13 latinskih zapiskov obravnavajo vakuum (2. poglavje) in pore med telesi. Za razliko od matematičnih delov rokopisa, polnih enačb, srečamo tu poskus utemeljitve obstoja vakuumu.

Glede vakuumu so bili Katezianci in Leibnitz v nasprotju z zagovorniki Newtona in Epikura (Raigersfeld 5). Vendar v povsem zapolnjenem prostoru gibanje ni možno, saj ne bi bilo prostora za premik (6).

Vakuum je tudi v medzveznem prostoru (7). V kartezijskem subtilnem fluidu (etru) je Raigersfeld (8) videl nasprotja. Menil je, da bi subtilni fluid ovalar gibanja planetov po vesolju (9). Ta argument je bil še večkrat uporabljen v drugi polovici 19. stoletja.

Raigersfeld je imel pore za presledek med dvema ali več (delci) snovi (10). V porah je neskončno več vakuumu kot v samih telesih (11). Prav tako je v porah veliko več vakuumu kot materije. Zadnje razmerje je Raigersfeld (11) izrazil tudi s številkami. Teža je sorazmerna količini materije v snovi. Zato je v snovi toliko več vakuumu, čim lažja je. V ozadju takšnega razmišljanja čutimo domnevo o enakih atomih z različno medsebojno oddaljenostjo v snoveh.

Pore v telesih omogočajo širjenje zvoka in svetlobe (12). Delci, ki se gibljejo skozi snov, občutijo odbojno silo (repulzijo). Pri drugih medsebojnih razdaljah med delci pride do privlačne sile (kohezije) (13).

Domneva o alterniranju sile na submikroskopski ravni je gotovo zadevala teorijo Ruđerja Josipa Boškovića (1711-1787), objavljeno v Philosophia Naturalis leta 1758. Raigersfeld ni citiral Boškovićevega dela, saj je bilo zelo novo v času njegovih zapiskov, ki so s citati zelo skopi. Gotovo sta Boškovićevo delo poznala oba Raigersfeldova učitelja, J. Schoettl in P. Mako. Bošković je namreč leta 1758 na poti iz Dunaja v Benetke prespal noč na jezuitskem kolegiju v Ljubljani (Markovčič, 1982).

d) Izpitne teze na liceju v Ljubljani v drugi polovici 18. stoletja

Natisnjene so bile izpitne teze profesorjev liceja v Ljubljani za leta 1756 (Pogrietschnig) 1760 (Tauferrer), 1771-1773 (G.Schoettl) in 1778-1780 (Ambschel). V nobeni izmed tez ni posebnih vprašanj o vakuumu.

I. Tauferrer je v tezah za leto 1760 menil, da razredčenje teles nastane zaradi širjenja por (votlin), ki ga povzroča vstop neštetih delcev ognja. Analogno naj bi zgostitev povzročalo krčenje votlin zaradi kohezije. Zaradi motenj v ravnovesju etra naj bi prišlo do izhlapevanja zelo finih delcev iz votlin snovi.

Pogrietschnig je leta 1765 v izpitnih tezah omenjal barometer. Vendar ga je obravnaval z meteorološkega stališča, puščajoč v nemar fiziko vakuumu v barometru.

Gregor Schoettl je v svojih izpitnih tezah za leto 1771 obravnaval fluide nasploh in še posebej vodo. V 34. in 35. vprašanju je obravnaval paro, vendar ni omenil ne parnega stroja, ne vakuumu.

e) Popis knjig o vakuumu, dosegljivih v kranjskih knjižnicah 18. stoletja:

avtor, naslov, kraj, leto izdaje	knjižnica (leto popisa, signatura)
1. Mayeri, Pneumatica	Mayr, prodajni katalog, jesen 1678
2. Augustin Mayr, Luft-Luft und Feuer Kunst, Alm Schultes 1680;	Wilde(1540)
3. Pascal, Traite de l'equilibre des liqueurs(1:1663), 1698	Erberg 1798
4. Jannut Gobart S.J. Tractatus de barometro, dve izdaji: Gradec 1706 in Dunaj 1716	Erberg 1798
5. R. Boyle, Experimentum Novorum, Geneve 1682	Wilde(1420), Čop (8340-46)
6. Descartes, Opuseula posthuma, Amsterdam 1704	Wilde (1421)

- | | |
|--|-----------------------------|
| 7. Jos. Ant. Haymon, Diser.
Physico-Medica de Aire,
Dunaj 1758 | Wilde(1452) |
| 8. P. Musschenbroek, Machines
pneumatiques, Leyden 1739; | Wilde (1442),
Čop (8463) |
| 9. Dissertatio Phisica de
corpore generatim, de
que opposito eidem vacuo,
Tyrrnavia 1754; | Wilde (1483) |
| 10. Laur Gobart S.J., Tractatus
philosophicus de Barometro,
Gradec 1746; | Wilde(1494) |
| 11. Simplicium, Mercuri in
Barometro, Gradec 1752; | Wilde(1568) |

POJASNILO: Franc Wilde je opravil popis knjižnice na liceju v Ljubljani med leti 1789 in 1809. Prvi katalog je iz leta 1790, prvi znanstveni pa iz leta 1803 z dodatkom. Čop in Kalister sta popisala isto knjižnico med leti 1826 in 1831, nove knjige pa so pozneje še dopisovali.

Uporabljene okrajšave:

NUK - Narodna in univerzitetna knjižnica v Ljubljani
SBL - Slovenski bibliografski leksikon
(n) - število strani v rokopisu

Literatura

1. Čop Matija in Kalister Matija, Katalog licejskih knjig iz leta 1826-1831 z poznejšimi dopisi, NUK
2. Erberg Bernhard Ferdinand, Fizika, sine dato, okoli leta 1744, Arhiv Slovenije, Zbirka rokopisov 242 r
3. Kersnik Janez Krsnik, Inventaire, Popis naprav v kemijskem in fizikalnem kabinetu Centralnih šol v Ljubljani za leto 1811, Zgodovinski muzej Ljubljana, akc.fond 1, Arh.enota 53. Inventarium, Popis naprav v fizikalnem kabinetu Liceja v Ljubljani za leto 1847, Zgodovinski muzej Ljubljana, akc.fond 1, Arh.enota 76.
4. Kovačič Lojze, Rokopisi o slovenskih jezuitih, julij 1993
5. Markovčić Željko, Ruđe Bošković, Zagreb 1982
6. Mayr Joannis Baptistae, Catalogus Librorum qui Nundinis Labacensibus Autumnalibus in Officina Libraria, Ljubljana 1678, Reprint Narodnega muzeja v Ljubljani
7. Mitteis Heinrich, Inventarium, Popis naprav v fizikalnem kabinetu gimnazije v Ljubljani za leto 1866, Zgodovinski muzej Ljubljana, akc.fond 1, Arh.enota 48.
8. Müllner A, Die Realistischen Disciplinen am Laibacher Jesuiten Collegium, Argo IX (1901) 171
9. Raigersfeld (Rakovec) baron Michael, Annotationes Accomodata ad Compendioria Physicis Patri Pauli Mako S.J.; Philosophia in Alterum annum Auditor sub Professor R.P. Joanne Schottl In Collegio Regio Theresiano, Anno 1763, Arhiv Slovenije, Zbirka rokopisov, 149 r.
10. Wilde Franc, Katalog knjig liceja v Ljubljani 1789-1809, z dodatkom (Supplementum), NUK
11. Zois Žiga, Katalog knjig iz leta 181?, NUK

IZOBRAŽEVANJA V LETU 1994

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije

organizira že več kot dve desetletji različne strokovno izobraževalne tečaje s področja vakuumistike. Za leto 1994 razpisujemo naslednje:

1. Vzdrževanje vakuumskih naprav

(19.-21. april, 15.-17. november)

Na tečaju bo predvsem obravnavana tematika, ki jo srečujemo v tehniki grobega vakuumu, to je: delovanje, vzdrževanje in popravila rotacijskih črpalk, pregled in uporaba različnih vrst črpalk, ventilov in drugih standardnih elementov, meritve vakuumu, hermetičnost in odkrivanje netesnosti v vakuumskih sistemih, materiali za popravila ter tehnike čiščenja in spajanja. Tečaj bo trajal 20 ur, od tega več kot tretjina praktičnih prikazov in vaj. Cena tečaja je 24.000 SIT. Vsak tečajnik prejme tudi brošuro "Vzdrževanje vakuumskih naprav" in potrdilo o opravljenem tečaju.

2. Osnove vakuumске tehnike

(18.-20. oktober)

Tečaj podrobneje obravnava ista področja kot prvi, poleg tega pa še: pomen in razvoj vakuumске tehnike, fizikalne osnove, črpalke za visoki vakuum, tankoplastne in druge vakuumске tehnologije, čiste postopke, analize površin ter doziranje plinov, čiščenje in preiskave plinov - skupno 22 ur z vajami in ogledom Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko. Cena tečaja je 20.000 SIT. Udeleženci prejmejo zbornik predavanj "Osnove vakuumске tehnike" in potrdilo o opravljenem tečaju.

3. Vakuumska tehnika za predavatelje srednjih šol (avgust, september, november)

Vsebina tečaja v obliki delavnice je podobna kot pri "Osnovah vakuumске tehnike". Poudarek je na prikazu fizikalnih pojavov v vakuumu in na predstavitvi pomembnosti vakuumskih postopkov v sodobnih tehnologijah. Več je vaj, ki so izbrane tako, da jih je možno z nekaj osnovne opreme izvajati tudi v šolskih laboratorijih za dijake. V delavnico je vključena tudi izdelava seminarske naloge po pravilniku Ministrstva za šolstvo in šport, ki udeležbo na tej delavnici točkuje z 1 točko pri dopolnilnem izobraževanju.

Vsi tečaji se bodo pričeli ob 8,00 uri v knjižnici Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, Ljubljana.

Prosimo zainteresirane, da se informativno prijavijo čimprej, za dokončno potrdilo udeležbe pa velja kopija položnice o plačilu - najkasneje štiri dni pred pričetkom tečaja, na naslov:

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 61111 Ljubljana (št. ŽR: 50100-678-52240).

Prijave sprejema organizacijski odbor (Koller, Spruk, Mozetič, Nemanič), ki daje tudi vse dodatne informacije; (tel. 061 263 461).

I.O. DVTS

NASVETI

Izganjanje vodnih par iz rotacijskih črpalk

V prejšnjem Vakuumistu smo že razložili izganjanje vodnih par, ki jih črpamo z rotacijskimi črpalkami, ki uporabljajo olje za svoje tesnjenje (in tudi mazanje vrtečih se delov). Kot vemo, se vodne (pa tudi druge) pare, ki jih črpamo iz vakuumskih posod, v črpalki kondenzirajo (utekočinijo), se pomešajo z oljem, ga s tem onesnažijo, mu zmanjšajo njegove mazivne lastnosti, povzročajo korozijo notranjih delov ter poslabšajo črpalčin končni vakuum. Da bi to preprečili, uporabljamo "dodajanje zraka" ("gas ballast"), ki ga uvajamo skozi poseben, nastavljeni ventil v kompresijski prostor črpalke. Ugotovili smo, da moramo pri hladni črpalki (npr. ob zagonu) obvezno odpreti ventil za dodajanje zraka, dotok dodatnega (balastnega) zraka pa mora biti tem večji, čim večja je obremenitev črpalke s parami.

Zelo pomembna delovna omejitev za te vrste črpalk je **dovoljeni tlak vodne pare** na vhodu črpalke (MAX. TOREABLE VAPOUR INLET PRESSURE).

ZGLED 1: Določiti je treba **dovoljeni tlak vodne pare na vhodu črpalke**, $p_v \max$, ki ima vgrajen ventil za dovajanje zraka in ki deluje pri črpalni hitrosti $S_p = 6$ l/s ($=21,6$ m³/h), če je pretok "balastnega" zraka npr. $Q_b=400$ mbar l s⁻¹, tlak na izpušni strani črpalke $p_{iz}=1200$ mbar, temperature črpalkega olja pa so: 333 K (60°C), 343 K (70°C) ali 353 K (80°C). Nasičeni parni tlak vode (p_s) je pri teh temperaturah (glej sliko 3 v prejšnjem Vakuumistu): $p_{s,60°C}=199$ mbar, $p_{s,70°C}=320$ mbar in $p_{s,80°C}=480$ mbar.

Za izračun uporabimo enačbo:

$$Q_b \geq S_p \cdot p_v \left(\frac{p_{iz}}{p_s} - 1 \right) \quad p_v \leq \frac{Q_b}{S_p} \cdot \frac{1}{\left(\frac{p_{iz}}{p_s} - 1 \right)}$$

$$p_v \leq \frac{400}{6} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1200}{199} - 1 \right)} = 13,3 \text{ mbar}$$

Pri temperaturah črpalke oz. olja v njej:

- 60°C je $p_v \max = 13,3$ mbar
- 70°C je $p_v \max = 24,2$ mbar
- 80°C je $p_v \max = 44,5$ mbar

Iz tega zgleda sledi: **Čim toplejša je črpalka, tem večji je dovoljeni tlak vodne pare na njenem vhodu.**

V katalogih nekaterih proizvajalcev lahko najdete najbolj pogost podatek za majhne enostopenjske rotacijske črpalke (do 20 m³/h) 70 mbar, za večje (od 30 do 250 m³/h) pa 33 mbar; podatki veljajo za črpalke, ogrete na delovno temperaturo.

Druga važna spremenljivka pa je masa pare, ki jo črpalka izvleče v nekem času pri tem (tj. dovoljenem) tlaku vodne pare, ki se imenuje tudi MASNI PRETOK ČRPALKE, M_v .

Izračunamo ga iz ravnotežnega stanja:

$$p_v \cdot S_p = 10^{-2} \left(\frac{M_v}{M} \right) R_0 T \text{ ali}$$

$$M_v = 100 \cdot S_p \cdot p_v / R_0 T \quad [\text{g / s}] \text{ oz.}$$

$$M_v = 360 \cdot S_p \cdot p_v / R_0 T \quad [\text{kg / h}] ,$$

kjer je:

M molekularna masa pare (za vodo je $M=18$)

S_p črpalna hitrost v l/s

p_v parni tlak (vode) na vhodu črpalke v mbar

$R_0=8,31 \times 10^3$ JK⁻¹kg mol⁻¹ (univerzalna plinska konstanta)

T temperatura pare na vhodu v črpalko v K (kelvin)

Za vodno paro ($M=18$) pri 293 K (20°C) je pretok pare v kg/h:

$$M_v=2,67 \cdot 10^{-3} \cdot S_p \cdot p_v$$

ZGLED 2: Določiti je treba **dovoljeni pretok vodnih par** v kg/h skozi črpalko, ki deluje s črpalno hitrostjo 6 l/s, če je pretok "balastnega" zraka: $Q_b=400$ mbar l/s, tlak na izpuhu črpalke pa je: $p_{iz}=1200$ mbar in temperature olja: 333 K (60°C) ali 343 K (70°C) ali 353 K (80°C).

Iz prejšnjega zgleda vemo, da je dovoljeni parni tlak vode na vhodu črpalke pri temperaturi olja 333 K (60°C): $p_{v \max}=13,3$ mbar, pri 343 K (70°C) je 24,2 mbar in pri 353 K (80°C) 44,5 mbar.

Iz enačbe: $M_v=2,67 \cdot 10^{-3} \cdot S_p \cdot p_{v \max}$ dobimo:

za temperaturo črpalke oz. njenega olja 60°C dovoljen pretok vodnih par (M_v) 0.213 kg/h, za 70°C 0.387 kg/h in za 80°C 0.713 kg/h

Iz tega zgleda sledi: **Čim toplejša je črpalka, tem večja je količina (masa) vodne pare, ki jo izčrpa iz vakuumske posode v časovni enoti pri konstantnem pretoku "balastnega" zraka.**

V tujih katalogih pa lahko najdete naslednje podatke za največji dovoljeni pretok vodnih par (WATER VAPOUR CAPACITY), in sicer za majhne enostopenjske rotacijske črpalke (do 20 m³/h) od 0,2 do 0,8 kg/h, za večje (od 30 do 250 m³/h) pa od 0,9 do 6,9 kg/h, prenosorazmerno z velikostjo črpalke.

Če si boste, dragi bralci, od vsega navedenega zapomnili vsaj to, da se splača odpirati "gas ballast" ventil, in boste to tudi prakticirali, ste si naredili veliko uslugo, črpalka pa vam bo hvaležno služila vrsto let. Torej: OB ZAGONU ČRPALKE ODPRITE VENTIL ZA DODAJANJE ZRAKA VSAJ ZA POL URE, PO KONČANEM ČRPAJU VAKUUMSKE POSODE (potem ko ste zaprli dovodni ventil k črpalki) PA SPET VSAJ ZA POL URE.

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

ZASTOPSTVO
AEG
OLYMPIA

Direktni uvoz nam je omogočil
še bolj znižati cene **računskih,**
pisalnih in fotokopirnih strojev
vrhunske kvalitete. Po tako
nizkih cenah jih na sloven-
skem tržišču še ni bilo. Redna
preskrba z rezervnimi deli je
zagotovljena.

2 leti garancije in lasten servis;
AEG OLYMPIA in olivetti



olivetti

Registrske blagajne,
računski in fotokopirni
stroji ter potrošni
material zanje po
izredno nizkih cenah.

TRGOVINA-SERVIS

KOTAR

SLOVENIJA, 61115 Ljubljana, Ziherlova c. 6
tel.: (386) 061/125-71-64, 125-72-20, 222-313



PC
KOTAR

- * računalniki
- * konfiguracije po vaših
željah in potrebah
- * obnovljiva garancija na
posamezne komponente

3 letna garancija



- **VAKUUMSKI SISTEMI**
- **VAKUUMSKE KOMPONENTE**

IEVT - oddelek za razvoj vakuumskih komponent in sistemov

Imamo več kot 30-letne izkušnje z načrtovanjem in izdelavo vakuumskih sistemov ter pri razvoju visokih tehnologij. Naši izdelki so standardni ali izdelani po naročilu in so 100% preizkušeni na tesnost. Uvajanje standarda ISO-9000, uporaba kvalitetnih materialov (nerjavno jeklo, Al itd) in modernih tehnoloških postopkov (specialna varjenja, leak detekcija, analiza materialov itd.) nam omogočajo doseganje kvalitete, ki je na področju tehnike visokega vakuumu nujno potrebna.

Sistemi:

- za grobi, srednji, visoki in ultravisoki vakuum
- ročni, računalniško krmiljeni
- laboratorijski, proizvodno tehnološki (prijemalne naprave, impregnacija, sušenje, polnjenje elementov, napajanje,...)

Komponente:

- spojke in prirobnice: ISO-KF, ISO-CF, ISO-K
- prevodnice: električne, za prehod plinov in tekočin ter za prenos gibanja
- spojni cevni kosi: reducirni ter oblike I,L,T,X
- ventili: ročni, el.pnevmatski, za različna področja vakuumu in uporabe (ravni, kotni, ploščati, dvopotni, igelni itd...)
- črpalke: membranske, rotacijske, difuzijske
- merilniki s senzorskimi glavami (Pirani, Penning), merilniki grobega vakuumu
- adsorpcijske pasti, filtri, okna, stekleni deli
- komore in zvonovi s standardnimi in specialnimi priključki, s hlajenjem oz. z ogrevanjem itd.
- prehodni kosi: kovinski mehovi, spoji steklo-kovina, keramika-kovina

Storitve:

- testiranje tesnosti in odkrivanje netesnih mest s helijevim leak detektorjem
- hermetični spoji: kovina-keramika, kovina-steklo, kovina-kovina (TIG, laser, mikroplazma, spajkanje)
- VV in UVV inženiring ter svetovanje
- servisi, meritve, priklop in zagon naprav ter vzdrževalna dela
- razvoj in postavitev vakuumskih tehnoloških postopkov
- izobraževanje kadrov (v sklopu z Društvom za vakuumsko tehniko Slovenije)
- nanos tankih plasti (napajanje, napršenje)
- visokozahtevna steklopihaška dela
- toplotne obdelave manjših predmetov v vakuumu in v inertni atmosferi
- mikroanalize sestave površine in globinskih profilov materialov (AES, SEM)

Za vse standardne komponente so na voljo tudi posamezni prospekti s tehničnimi podatki. Podrobnejše informacije dobite na oddelku Vakuumski sistemi in komponente".



INŠTITUT
ZA ELEKTRONIKO
IN VAKUUMSKO
TEHNIKO p. o.

TESLOVA ULICA 30, POB 59, 61111
LJUBLJANA, SLOVENIJA
TELEFON: (061) 267-341, 267-377, 263-461
TELEFAX: (061) 263-098, TELEX: 39714/IEVT



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:

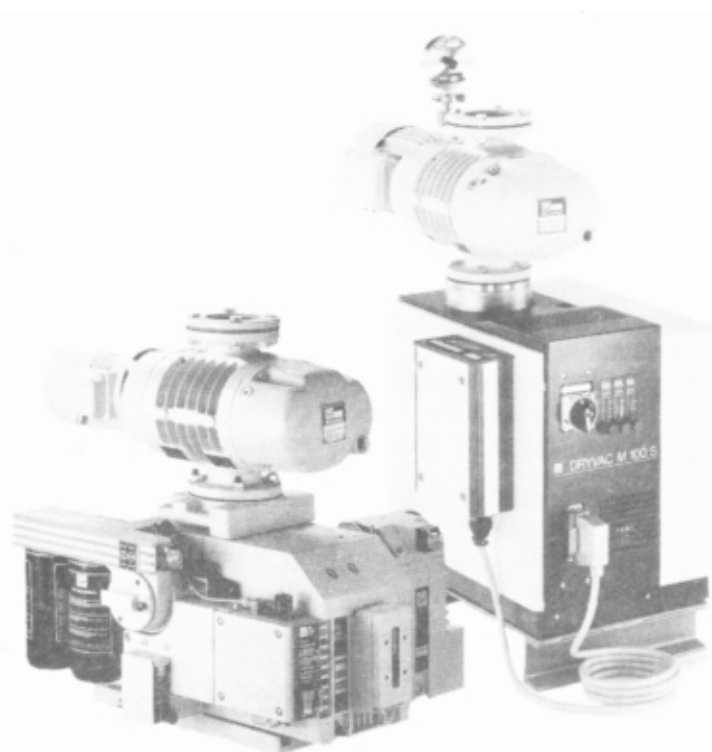
- za kemično in drugo industrijo

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



Rotacijske črpalke

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 mikro-elektroniko, naprave za izdelavo kristalov
- **skupina UM** - vakuumske indukcijske peči (tudi za vliivanje), vakuumska metalurgija



Turbomolekularne črpalke

ZASTOPSTVO IN SERVIS

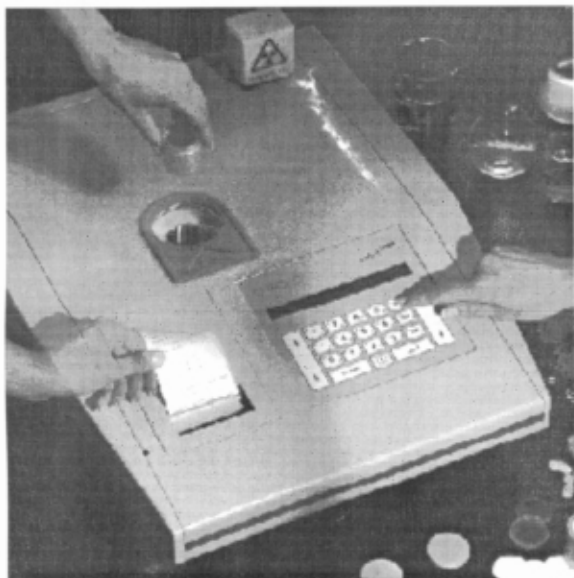
MEDIVAK

MEDIVAK d.o.o., Šolska ulica 21, 61230 Domžale
Tel.: (061) 7130060, Fax: (061) 713 060



**ZASTOPNIŠKO SERVISNO PODJETJE, Breg ob Kokri 7,
64205 PREDDVOR**
d.o.o. Tel. 064/45-383, Fax 064/45-050

SMO ZASTOPNIK IN EKSKLUZIVNI DISTRIBUTER ZA OXFORD INSTRUMENTS MAG IN AIR LIQUIDE CRYOGENIE.



RENTGENSKA FLUORESCENTCA
TIP LAB-X³⁰⁰⁰ ZA KONTROLO KVALITE
(UPORABLJA RENTGENSKO CEV IN NIČ VEČ
IZOTOPOV!)

OXFORD



EDS - ENERGIJSKO DISPERZIVNI
SISTEM TIP EXL II



DEWAR POSODE ZA TEKOČE PLINE - TEKOČI DUŠIK, HELIJ,
ARGON, KISIK, OGLJIKOV DIOKSID

POSODE SO RAZLIČNIH VELIKOSTI OD 0,5 L DO 1000 L.



Samo najboljši instrumenti



Samo najboljši analitski instrumenti
so dovolj dobri za nas in naše
stranke. Da so res najboljši, pove
že njihova znamka, za njihovo
uglasitev pa poskrbimo mi.



KemoAnalitika

Rožna dolina V/24, 61000 Ljubljana
tel.: (061) 261-957, 274-231, fax 123-1230