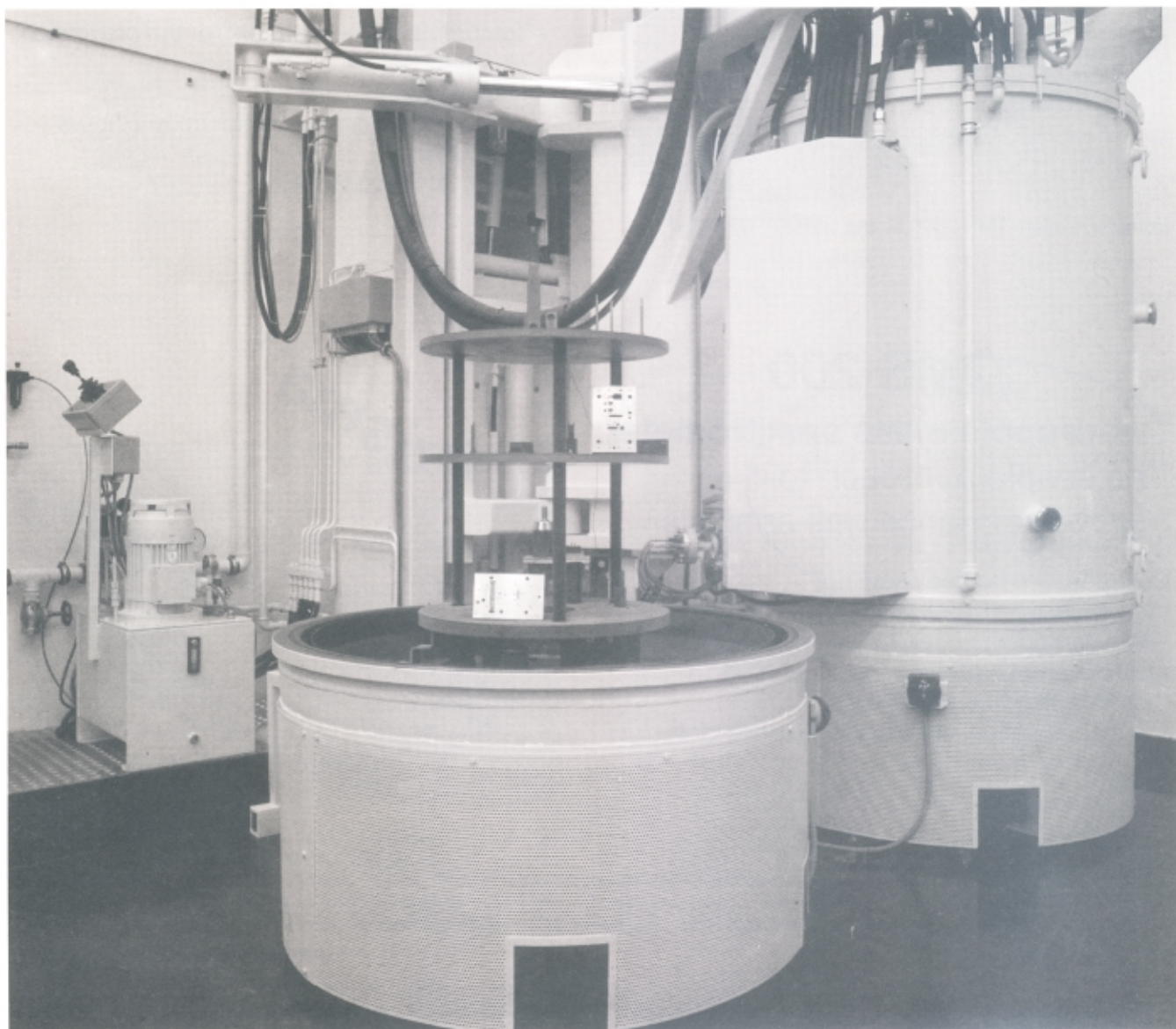


VAKUUMIST

ČASOPIS ZA VAKUUMSKO ZNANOST, TEHNIKO IN TEHNOLOGIJE, VAKUUMSKO
METALURGIJO, TANKE PLASTI, POVRŠINE IN FIZIKO PLAZME

LJUBLJANA, JULIJ 95

LETNIK 15, ŠT. 2, 1995



VSEBINA

- Nitiranje v pulzirajoči plazmi (V. Leskovšek)

- Pregled metod za pripravo trdih prevlek (P. Panjan, B. Navinšek)

- Zgodovina pospeševalnikov: Od idej do prvih izvedb (S. Južnič)

- NASVETI

- IZOBRAŽEVANJE

- DRUŠTVENE NOVICE

- OBVESTILA

Slika na naslovni strani prikazuje napravo za **nitiranje orodij in strojnih delov v pulzirajoči plazmi** (METAPLAS IONON GmbH, Nemčija). Tehnologijo ionskega nitiranja so osvojili raziskovalci **Centra za vakuumsko toplotno in kemotermično obdelavo na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije** v Ljubljani. Projekt so finančno podprli tovarni KOLEKTOR iz Idrije in GORENJE ORODJA iz Velenja ter Ministrstvo za znanost in tehnologijo.

Obvestilo

Naročnike Vakuumista prosimo, da čim prej poravnate naročnino za leto 1995.

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

SPONZORJI VAKUUMISTA:

- Ministrstvo za znanost in tehnologijo Slovenije
 - Ministrstvo za šolstvo in šport Slovenije
- balzers* Balzers Hochvakuum Ges. m. b. H., Dunaj

- VAKUUMIST
- Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije
- Glavni in odgovorni urednik: dr. Peter Panjan
- Uredniški odbor: mag. Andrej Demšar, dr. Jože Gasperič (urednik za področje vakuumske tehnike in sistemov), dr. Bojan Jenko, dr. Monika Jenko (urednica za področje vakuumske metalurgije), dr. Alojzij Križman, dr. Ingrid Milošev, mag. Miran Mozetič, mag. Vinko Nemanič, Marjan Olenik, dr. Boris Orel, mag. Andrej Pregelj, dr. Vasilij Prešern in dr. Anton Zalar
- Lektor: dr. Jože Gasperič
- Korektor: Tomo Bogataj
- Naslov: Uredništvo Vakuumista, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 61000 Ljubljana, tel. (061)123-13-41
- Številka žiro računa: Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, 50101-678-52240
- Grafična obdelava teksta: Jana Strušnik
- Tisk: Biro M, Žibertova 1, Ljubljana
- Naklada 400 izvodov

NITRIRANJE V PULZIRAJOČI PLAZMI

Vojteh Leskovšek, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 61000 Ljubljana, Slovenija

Pulse Plasma Ionitriding

ABSTRACT

Pulse Plasma Ionitriding, one of the IONIT processes of METAPLAS IONON GmbH, is a modern and environmentally clean nitriding, which meet the material and case hardness requirements of the components. Microprocessor control permits a fully automatic nitrogen-diffusion process using ion bombardment under vacuum, a process exclusively applied for IMT in Slovenia. The work pieces to be nitrided are either suspended from a fixture or placed directly on the furnace heart. The pumping system produces the programmed vacuum level and the work pieces are then heated to the proper temperature for the surface treatment. The gas composition, the gas pressure and the temperature determine what type of the surface treatment will take place. A pulsed voltage is applied between the work pieces and the furnace wall. This voltage accelerates electrons to very high velocities (in this special case, very high velocities are functionally equivalent to very high temperatures) permitting them to ionize and activate normally inert gases like nitrogen so that the specified surface treatment can take place. The high energy but thermally low temperature ionized gas mixture is called the plasma. The high electron energy in the plasma permits physical and chemical reactions to take place that would normally require much higher surface temperatures. The PULSE PLASMA IONITRIDING system allows the temperature of the work pieces and the surrounding inert gas to remain relatively low during the entire surface treatment so the work pieces can retain their original core properties.

POVZETEK

Nitriranje v pulzirajoči plazmi je najsodobnejši postopek podjetja METAPLAS IONON GmbH, imenovan IONIT. Izpolnjuje skoraj vse zahteve, ki so povezane z utrjevanjem površin orodij in strojnih delov, povečuje trajno nihajno trdnost ter je okolju prijazen. Mikroprocesorsko krmiljenje omogoča avtomatsko vodenje procesa difuzije dušika med ionskim obstreljevanjem površin v vakuumu. Orodja ali strojne dele, ki jih nitriramo, pritrdimo na posebno ogrodje, ali pa jih naložimo na osnovno ploščo komore. V vakuumskem sistemu dosežemo programiran vakuum, čemur sledi vpuščanje dušika in konvekcijsko segrevanje orodij ali strojnih delov na temperaturo, ki je 50°C nižja od temperature nitriranja. Postopek nitriranja v pulzirajoči plazmi poteka v vakuumu pri tlakih 0,01 do 13 mbar. V komoro običajno dovajamo zmes vodika in dušika, orodja ali strojni deli pa so priključeni na negativno enosmerno pulzirajočo napetost nekaj kV, ki povzroči ionizacijo plinske mešanice, tako da lahko poteka željena kemotermična obdelava. Ionizirano plinsko mešanico imenujemo plazma. Ioni z visoko energijo omogočajo v plazmi potek fizikalnih in kemičnih reakcij, ki bi sicer zahtevale višje temperature na površini orodij ali strojnih delov. Okrog orodij ali strojnih delov se na ta način ustvari tlenje v plazmi in pri gostoti toka 0,1 do 10 mA/cm² se ti segrejejo do temperature nitriranja. V takih razmerah se orodja ali strojni deli nitrirajo od 1 do 24 h, odvisno od velikosti, njihove mase in željene globine nitriranja. Dobljena spojinska plast τ' ali ϵ je debela od 2 do 10 μ m, difuzijska plast pa seže od 0,03 do 0,8 mm globoko. Dosežena trdota na površini je 750 do 1250 HV, odvisno od materiala. Postopek NITRIRANJA V PULZIRAJOČI PLAZMI je posebej prirejen za potrebe IMT. Nizke temperature nitriranja omogočajo, da jedra orodij oziroma strojnih delov ohranijo tudi po nitriranju svoje prejšnje mehanske lastnosti. S spremembo parametrov postopka pa lahko uravnavamo tudi hrapavost nitrirane površine.

1 Uvod

Tehnologija nitriranja v pulzirajoči plazmi je nova in se v slovenskih orodjarnah in strojogradnji še ne uporablja. Vse več orodjarn in proizvajalcev strojnih delov se preusmerja na zahtevna tržišča, kupci pa pogosto naročila orodij in strojnih delov tudi z možnostjo tovrstne

kemotermične obdelave. Uporabniki storitev vakuumске toplotne obdelave so pokazali velik interes, da na IMT uvedemo in osvojimo tehnologijo ionskega nitriranja v pulzirajoči plazmi na nivoju pilotne proizvodnje, kajti dosedanje izkušnje z uvedbo vakuumske toplotne obdelave so pokazale, da je na ta način možen kakovosten prenos tehnologije v prakso.

Nakup peči za nitriranje v pulzirajoči plazmi sta omogočila s sovlaganjem KOLEKTOR, Idrija in GORENJE ORODJA, Velenje ob veliki finančni pomoči MZT, drugi uporabniki storitev pa so finančno podprli projekt osvajanja tehnologije nitriranja v pulzirajoči plazmi.

Kratek kronološki pregled tehnike nitriranja

Tradicionalna tehnika nitriranja, ki jo uporabljamo za povečanje obrabne obstojnosti in izboljšanje trajne nihajne trdnosti pri orodjih in strojnih delih, se uporablja že več kot šestdeset let. Zgodovina ionskega nitriranja je skoraj enako dolga. Kratek kronološki pregled je naslednji:

Čas	Opis
1920	Zasnovo segrevanja kovinskih kosov s plazmo v nevtralnem plinu je odkril Franz Skaupy v Nemčiji.
Sredi 1920	Egan, ZDA, predlaga zasnovo ionskega nitriranja.
Konec 1920 Začetek 1930	Bernard Berghaus, Nemčija, uspešno demonstrira postopek ionskega nitriranja ter ugotovi večino tehnoloških parametrov.
Druga svetovna vojna	V Nemčiji ionsko nitrirajo notranjo površino topovskih cevi.
Po drugi svetovni vojni	Napredek v elektroniki, problemi zaščite okolja in visoki stroški pri tradicionalnih postopkih nitriranja ter dokazano boljše metalurške lastnosti, ki jih omogoča ionsko nitriranje, so temu postopku omogočili široko uporabnost na različnih industrijskih področjih v Nemčiji, Japonski, Kitajski, Franciji itd.

2 Opis procesa

2.1 Izvor različnih nazivov za postopek ionskega nitriranja

Nitriranje je postopek, ki se uporablja za površinsko utrjevanje delov, pri katerih je pomembna obrabna obstojnost in izboljšanje trajne nihajne trdnosti. Pri večini kovin nitrirana plast izboljša korozijsko obstojnost. Trdote, ki jih dosežemo po nitriranju v plazmi, se tudi pri

povišanih temperaturah ne zmanjšajo. Spojinsko plast z debelino do 75 μm in veliko trdoto tako dosežemo brez dodatnih toplotnih obdelav; na ta način se izognemo deformaciji izdelkov, ki jih nitriramo. Nitriramo lahko nizko legirana jekla z vsebnostjo aluminija in kroma, jekla za poboljšanje in cementacijo, orodna jekla, nerjavna jekla, jekleno, sivo, nodularno in temprano litino, titan in titanove zlitine ter aluminij in aluminijeve zlitine.

Pri tradicionalni tehniki nitriranja uporabljamo delno disociiran amonijak pri temperaturah med 480°C in 650°C. Časi obdelav so dolgi, nitriranje do željene globine lahko traja do 50 ur. Trdoto po nitriranju dosežemo brez dodatnih toplotnih obdelav.

Nitriranje v plazmi je proces, ki spremeni lastnosti površine in je podoben procesu oksidacije v plazmi. V nasprotju s kisikom pa dušik ne tvori negativnih ionov v plazmi ali v bližini površine, ki jo nitriramo. Zato ni pomembnega prispevka k procesu nitriranja iz gibanja negativnih ionov proti medplastju nitrid-kovina, ki bi bil podprt z učinkom električnega polja. Nitriranje v plazmi je izpopolnjen katodni proces, pri katerem orodja ali strojne dele obstreljujemo s pozitivnimi ioni dušika. Pri nitriranju v plazmi orodja ali strojne dele šaržiramo v komoro, v kateri dosežemo in vzdržujemo vakuum med 0.01 in 13 mbar. Tlak med 3 in 8 mbar lahko krmilimo tako, da optimiramo prodiranje tlenja v votline. V komori za nitriranje priključimo med osnovno ploščo, na katero nalagamo obdelovance (katoda), in steno komore (anoda) enosmerno napetost. Na ta način ustvarimo plazmo, ki jo lahko smatramo kot približno nevtralno mešanico pozitivno in negativno nabitih delcev, ki se nahajajo v področju tlivnega razelektrenja na katodi. Od tu izhaja naziv "Plasma/Ion process". Priključena enosmerna napetost je med 100 in 1500 V. Plazmo vzdržujemo znotraj področja izjemnega tlenja. Orodja ali strojne dele segrevamo z obstreljevanjem s pozitivnimi ioni, dosežene temperature 400-600°C pa so odvisne od priključene enosmerne napetosti.

K procesu nitriranja prispevata svoj delež tako atomski kot molekularni dušik. Pri nizkih temperaturah, ko so hitrosti difuzije majhne, rast nitrirane plasti pospešuje obstreljevanje z ioni. Za hitro rast nitrirane plasti je potreben povečan tok in gostota toka, kar dosežemo v področju izjemnega tlenja. Pri nitriranju v plazmi so značilne gostote toka med 0,1-10 mA/cm², napetosti pa med 500 - 1000 V. Veliko število parametrov, ki jih lahko ločeno kontroliramo, omogoča, da dobimo na površini orodij ali strojnih delov različne vrste nitridnih plasti, ki so pri tradicionalnih postopkih nitriranja nedosegljive. Peči za ionsko nitriranje imajo delovno prostornino od 0,1-8 m³. Obdelovanci, ki jih ionsko nitriramo, so velikosti 0,7 mm (kroglica pri kemičnem svinčniku) do posameznih kosov z maso več ton.

Nitriranje v plazmi poteka bodisi v čistem dušiku ali mešanici dušika in vodika, ob absorbiranju nevtralnih plinskih delcev so obdelovanci še dodatno obstreljevani z ioni dušika. Domnevamo, da igrajo odločilno vlogo molekularni dušiko-vodikovi ioni (NH⁺). Zamenjava vodika z argonom zmanjša globino nitrirane plasti, razprševanje površine (bolj učinkovito z argonom kot vodikom) je pri tem drugotnega pomena. Najboljše rezultate pri ionskem nitriranju dosežemo s plinsko mešanico dušika in vodika. Pri tlivnem razelektrenju se

največji padec napetosti zgodi le nekaj milimetrov od katode. Tako večina atomov ionizira v neposredni bližini katode, torej v področju katodnega padca, zato je nitriranje površine orodij ali strojnih delov praktično neodvisno od razdalje med njimi in steno komore. Tlenje je omejeno na področje okoli orodij ali strojnih delov in sledi njihovi konfiguraciji, vključno z zarezi in izvrtinami. Enakomerno obstreljevanje obdelovancev z ioni omogoča doseganje enakomerne globine nitrirane plasti.

Nitriranje v plazmi je rezultat različnih procesov, ki potekajo v reaktorju, kot so: razprševanje, segrevanje in kondenzacija. Energetsko bilanco iona, ki trči ob površino kovine in povzroči izbitje enega ali več atomov s površine, lahko izrazimo z naslednjo enačbo:

$$W_{\text{ion}} = W_f + W_{\text{kin}} + Q \quad (1)$$

kjer je:

W_{ion} = kinetična energija vpadnega iona

W_f = opravljeno delo za izbitje enega atoma iz površine

W_{kin} = kinetična energija razpršenega atoma

Q = preostanek energije, ki se pretvori v toploto.

Iz enačbe (1) je razvidno, da ioni, ki trčijo in prodirajo v površinsko plast kovine, prenesejo del svoje energije Q na orodja ali strojne dele in jih segrevajo. Dosežena temperatura je odvisna od energije iona (priključena napetost) in gostote iona (tok).

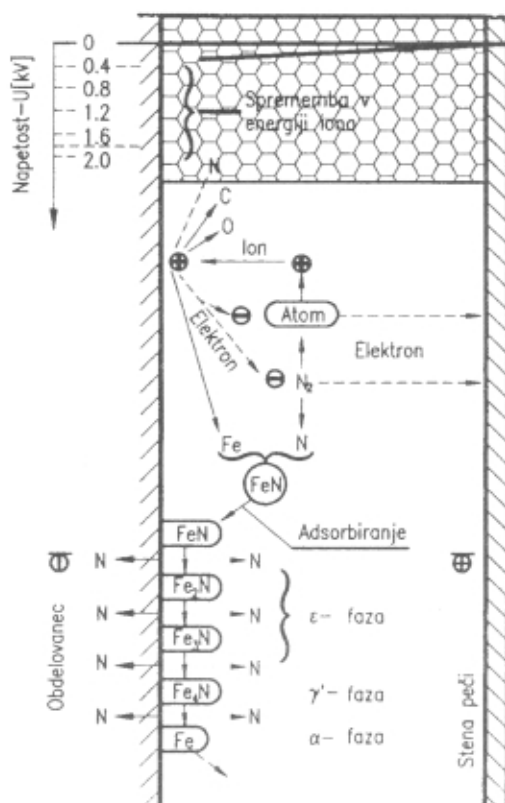
Pri procesu nitriranja je le majhen delež rezultat direktne vgradnje dušikovih atomov v površino, ki jo nitriramo. Pri nitriranju jekla reagirajo razpršeni ioni železa s površine z visoko aktivnimi atomi dušika v plazmi in tvorijo železov nitrid (FeN), ki se ponovno napari na površino. Ta nitrid je nestabilen in razpade na nižje nitride: Fe₂N, Fe₃N, Fe₄N, kot je to prikazano na sliki 1.

Dušik, ki se je sprostil z razpadom FeN, difundira v kovino. Bogata oskrba z dušikom že na začetku procesa ustvari veliko razliko v koncentraciji. Rezultat difuzije dušika v kovino je, da se železo nasiti z dušikom, nastajajo novi železovi nitridi, ki na površini tvorijo trdo površinsko plast železovih nitridov, imenovano tudi spojinska ali bela plast. Sočasno poteka difuzija dušika v notranjost, pri čemer se v obliki nitridov izločajo prisotni legirni elementi, ki tvorijo t.i. difuzijsko plast, v kateri se pojavijo tlačne napetosti.

To je fizikalna slika nitriranja s tlivno razelektivno (Glow Discharge Nitriding Process), ki ga poznamo tudi pod imenom Plasma/Ion Nitriding™, Ion Nitriding ali Plasma Nitriding.

Proces nitriranja v plazmi je mnogo hitrejši kot tradicionalne tehnike nitriranja zato, ker se ustvari že na začetku procesa visoka koncentracija dušika na površini kovine. Še več, sestavo nitrirane plasti lahko kontroliramo s posameznimi parametri plazme, kar je nesporna prednost v primerjavi s tradicionalnimi pos-

topki nitiranja, saj so lastnosti nitirane plasti izrecno odvisne od njene sestave. Vpliv nižjih temperatur nitiranja v plazmi v primerjavi s tradicionalnimi postopki nitiranja se v splošnem kažejo v višji dimenzijski stabilnosti obdelovancev, zato je ta postopek še posebej primeren za utrjevanje površin strojnih elementov, ki so izdelani v ozkem tolerančnem območju.



Slika 1. Reakcije na površini jekla med nitiranjem v plazmi [1]

2.2 Nitiranje v pulzirajoči plazmi

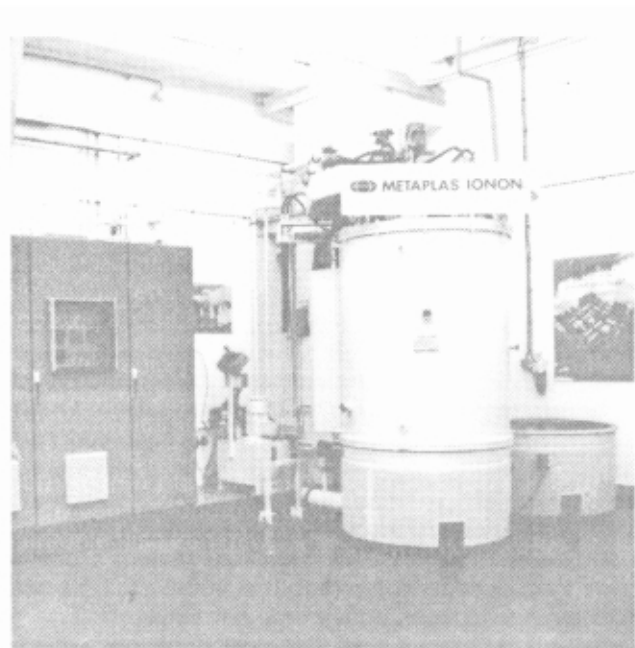
Peč za nitiranje v pulzirajoči plazmi (slika 2), ki smo jo postavili v Centru za vakuumsko toplotno in kemotermično obdelavo (CVT&KTO) na IMT, je sestavljena iz elektronskega komandno-kontrolnega dela, močnega dela ter vakuumске peči (dva podstavka in zvon).

Iz vakuumске peči z vakuumiranjem odstranimo nezaželene pline (zrak), temu sledi vpuščanje dušika. Za segrevanje orodij ali strojnih delov lahko izbiramo med konvekcijskim segrevanjem v dušiku, elektroprovodnim v vakuumu in segrevanjem v plazmi. Konvekcijsko segrevanje v dušiku nam omogoča zelo hitro in izenačeno segrevanje orodij ali strojnih delov različnih dimenzij do temperature, ki je 50°C nižja od temperature nitiranja, do temperature nitiranja $400\text{--}580^{\circ}\text{C}$ pa kose segrejemo v plazmi. Za vžig in vzdrževanje tlenja uporabljamo generator z enosmerno pulzirajočo napetostjo med 800 in 1000 V, ki jo lahko pulziramo s frekvenco do 33 kHz. Dolžino odmora in širino pulza lahko izbiramo v μs , ms ali s. Plinsko mešanico, ki jo lahko sestavljajo štirje plini, in sicer H_2 , N_2 , CO_2 in N_2O , pripravljamo v posebni mešalni komori, ki omogoča

poljubne deleže posameznih plinov in omogoča stabilen dovod plinske mešanice v vakuumsko peč.

Tlenje znotraj želenega območja napetosti nam pomaga vzdrževati sistem za krmiljenje tlaka med 10^{-1} in 10^{-2} mbar. Z elektronskim komandno-kontrolnim in registrirnim sistemom krmilimo postopek nitiranja v pulzirajoči plazmi. Po končanem nitiranju vložek ohladimo do sobne temperature s prisilno cirkulacijo dušika, kar močno skrajša čas ohlajanja.

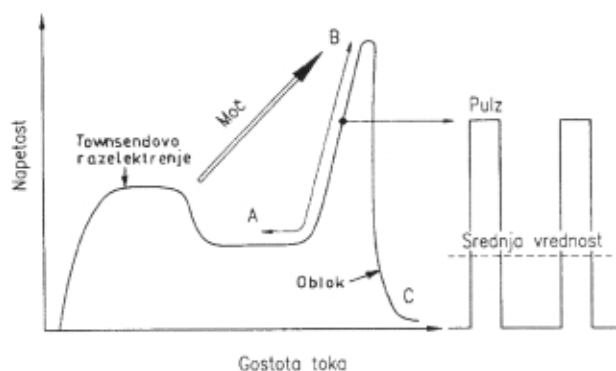
Razelektrjenje je odvisno predvsem od vrste in tlaka plina, od napetosti med elektrodama in geometrije. Pri ionskem nitiranju v pulzirajoči plazmi nas zanima le enosmerna napetost in območje, kjer je tok približno sorazmeren napetosti. Imenujemo ga območje izjemnega tlenja (abnormal glow). Manjši tokovi za ionsko nitiranje niso zanimivi.



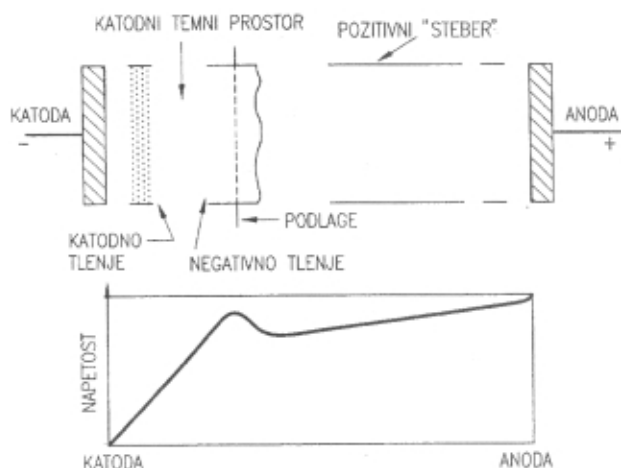
Slika 2. Peč za nitiranje v pulzirajoči plazmi

Med osnovno ploščo, na katero postavimo orodja ali strojne dele, in steno zvona priključimo enosmerno pulzirajočo napetost. Osnovna plošča predstavlja negativni pol, t.j. katodo, zvon pa pozitivnega, t.j. anodo. Ko priključimo pulzirajočo napetost, steče tok na način, ki ga poznamo pri plinski ali tlivni razelektritvi v diodi, npr. v elektronki z živosrebrnimi parami.

Diagram na sliki 3 prikazuje zvezo med napetostjo in tokom za plinsko mešanico dušika in vodika ($75\%\text{H}_2/25\%\text{N}_2$). Ionsko nitiranje začne potekati, ko jakost toka doseže področje izjemnega tlenja, ki je na diagramu prikazano med točkama A in B. V tem področju je gostota toka okoli celotne površine katode enakomerna. V tem režimu se ustvari okoli orodij ali strojnih delov enakomerno vijoličasto tlenje. Pri povečevanju toka znotraj področja izjemnega tlenja se povečuje tudi njegova gostota, kar ne vpliva na enakomernost tlenja.



Slika 3. Značilna odvisnost med napetostjo in tokom v pečih za nitiranje v pulzirajoči plazmi [2/]



Slika 4. Značilna porazdelitev tlenja in napetosti med katodo in anodo [3/]

Visoko stopnjo ponovljivosti rezultatov nitiranja in preprečevanje poškodb površine izdelkov zagotovimo z obratovanjem v področju izjemnega tlenja, in sicer na nivoju, ki je višji od točke A, mora pa biti nižji od B in ne sme doseči C. Na tak način dosežemo enakomerno nitiranje površine brez vročih točk (področja s povečano temperaturo). Pojav obloka in s tem vročih točk, ki je v preteklosti močno omejeval uporabo tega postopka, so uspešno rešili z uvedbo enosmerne pulzirajoče napetosti. To omogoča, da postopek nitiranja vodimo blizu točke B brez nevarnosti ustvarjanja vročih točk ali pregrevanja tankih presekov pri tako visokih energijah. Enakomerno nitridno plast dosežemo tako, da so orodja ali strojni deli med pulzom celovito obdani s plazmo. Odmor med dvema pulzoma pa omeji vnos energije na površino do najnižje, še sprejemljive vrednosti, ki omogoča zeleno enakomerno porazdelitev temperature v vložku in najboljšo kakovost površine ob najmanjši porabi energije, plina in hladilne vode.

Peč za ionsko nitiranje v pulzirajoči plazmi je opremljena z opazovalnimi linami, ki omogočajo, da med postopkom nitiranja opazujemo značilnosti in vpliv tlaka na izjemno tlenje. Omogoča pa tudi, da z optičnim pirometrom merimo temperaturo vložka in ugotavljamo njeno izenačenost med različno velikimi orodji ali strojnimi deli.

Značilnosti izjemnega tlenja so v grobem prikazane na sliki 4. Razelektrenje vzdržujejo elektroni, ki jih iz katode izbijajo pozitivni ioni. Energijo, potrebno za ionizacijo, pridobijo ti elektroni v katodnem temnem prostoru, kjer imamo praktično celoten skok potenciala. Vzrok za padec napetosti je velika gostota počasnih (v primerjavi z elektroni) ionov na meji med negativnim tlenjem in katodnim temnim prostorom.

Večina ionov nastane s trki med atomi plina in elektroni v območju negativnega tlenja. Tu praktično ni električnega polja in se ioni gibljejo pretežno zaradi difuzije. Tisti, ki pridejo do roba katodnega temnega prostora, se močno pospešijo v električnem polju in povzročajo razprševanje katode ter emisijo sekundarnih elektronov. Če naj se razelektrenje vzdržuje samo, mora posamezni elektron ionizirati toliko atomov (10 do 20), da potem ioni spet izbijajo vsaj en elektron.

Legi anode ne vpliva bistveno na električne lastnosti razelektrenja, dokler je ne premaknemo na rob katodnega temnega prostora. Tedaj se namreč začne število nastalih ionov zmanjševati in če premaknemo anodo v katodni temni prostor, razelektrenje izgine. Posamezna območja lahko ločimo po svetlosti, saj elektroni atome tudi vzbujajo in le-ti potem sevajo vidno svetlobo pri prehodih v osnovno stanje. Posebno svetlo je področje negativnega tlenja.

Tlivno razelektrenje spremlja vidno tlenje, ki se pojavi okoli katodnega področja. Barva in debelina tlivne korone je odvisna od vrste plina, tlaka, napetosti in toka. Zelo blizu katodne površine je zelo tanka temna plast, sledijo ena ali več tankih svetlih plasti (pri dušiku so rožnato obarvane), nato druga temna plast, tako imenovan Crookesov ali Hittorfov temni prostor, temu pa sledi svetleča difuzna plast (modrikasto/vijoličasta v dušiku), ki jo imenujemo negativno tlenje.

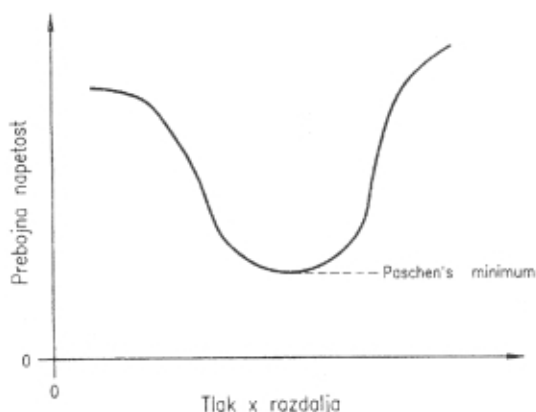
Področje med negativnim tlenjem in katodo igra važno vlogo v mehanizmu tlivnega razelektrenja. V tem področju pride do celotnega padca katodne napetosti, zato je to električno polje tu največje. V smeri proti anodi obstajajo še dodatna temna in svetla področja, ki pa niso pomembna za ionsko nitiranje.

Slika 4 prikazuje padec napetosti v plazmi (od katode do anode). Nakloni in premenske točke krivulje se spreminjajo v odvisnosti od tlaka, napetosti, toka in vrste plina. Kot je razvidno iz krivulje, se največji padec napetosti zgodi blizu katodnega področja, veliko manjši pa blizu anodnega, med njima pa praktično ni električnega polja.

Ko se tok v področju izjemnega tlenja (slika 3) povečuje, se začne pojavljati tlenje, ki pa ne prekrije v celoti površine katode. To kaže na neenakomerno gostoto električnega toka na površini orodij ali strojnih delov, in sicer zato, ker ioni sprejemajo energijo le na lokaliziranih področjih, običajno okoli ostrih robov in izpostavljenih delov orodij ali strojnih delov, ki jih nitiramo. Z nadaljnjim povečevanjem toka v področju izjemnega tlenja se orodja ali strojni deli v celoti obdajo s tlivno

korono, kar kaže na bolj enakomerno gostoto električnega toka. To je torej področje, kjer poteka enakomerno nitriranje orodij ali strojnih delov. Večina intenzitete sevanega elektromagnetnega valovanja je zelo dolgih valovnih dolžin, pretežno v infrardečem področju. V vidnem področju spektra intenziteta pada in postane praktično zanemarljiva v rentgenskem delu. Dejansko je intenziteta sevanja rentgenskih žarkov, ki je bila izmerjena na peči, pod OSHA mejami.

Ko električni tok povečamo preko področja izjemnega tlenja, se pojavijo obloki, t.j. pride do padca napetosti v posameznem plinu. Slika 5 prikazuje značilno krivuljo padanja napetosti v plinu kot funkcijo produkta tlaka in razdalje med anodo in katodo.



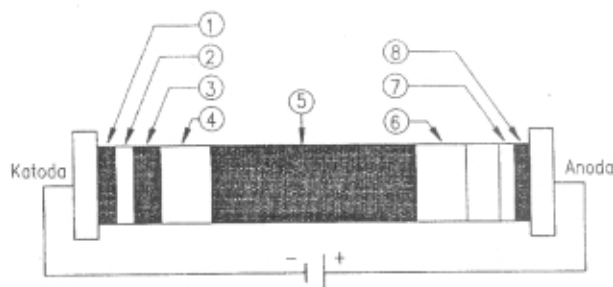
Slika 5. Značilni potek napetosti, ki ponazarja Paschenov zakon padca napetosti v plinu v odvisnosti od produkta tlaka in razdalje med anodo in katodo [4]

Nad krivuljo je področje preboja. Pojav oblokov je včasih viden in ima lahko uničevalen učinek na orodja ali strojne dele, in sicer v obliki jamičenja površine (pitting). Pod krivuljo je področje, ki je zaželeno za nitriranje.

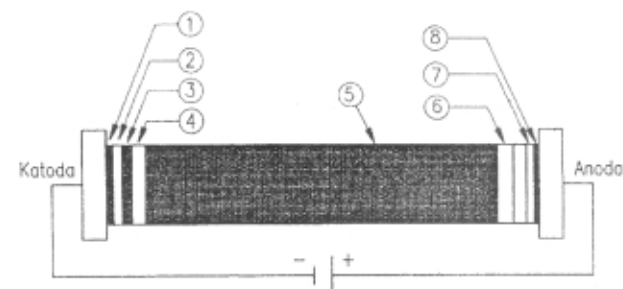
Najnižjo točko krivulje (t.j. najnižji padec napetosti) imenujemo Paschenov minimum, ki je značilen za dani plin. Krivuljo lahko premikamo od leve proti desni s spreminjanjem tlaka ali razdalje, vendar pa je ne moremo pomikati gor in dol. Na nesrečo pri nitriranju krmilimo tlak in razdaljo blizu spodnje točke krivulje. Zato moramo biti previdni, ko postavljamo orodja ali strojne dele z ostrimi konicami blizu roba katodne plošče.

Pri povečevanju tlaka v območju od 0,6 mbar (slika 6a) na 4 mbar (slika 6b) lahko vidimo, da se tlenje približa katodi. Ta pojav v praksi izkoriščamo za nitriranje izvrtin (višji je tlak, bolj se tlenje prilega orodju) ali za preskakanje le-teh tako, da preprečimo nitriranje v izvrtinah (nižji tlak). Pri orodjih ali strojnih delih z zelo razgibano obliko lahko tlak krmilimo tako, da je nitrirana celotna površina ali pa le izbrana površina. Selektivnost je omejena tako, da bodo vse votline oziroma izvrtine nad izbranim nivojem tlaka nitrirane, vse votline in izvrtine

pod izbranim nivojem tlaka pa ne, medtem ko pri tistih, ki se nahajajo vmes, lahko pričakujemo pojav t.i. votle katode, slika 7.



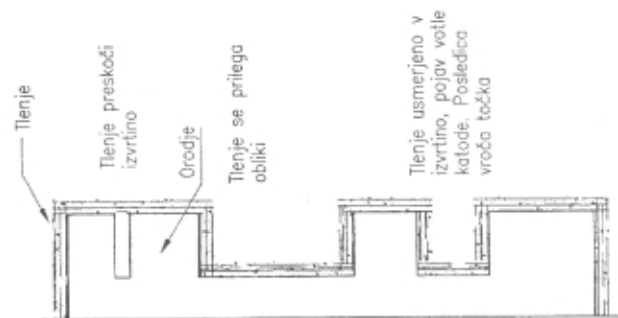
a) Vidna porazdelitev tlenja pri nizkem tlaku



b) Vidna porazdelitev tlenja pri povišanem tlaku

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| 1. Astonov temni prostor | 5. Faradayev temni prostor |
| 2. Katodno tlenje | 6. Pozitivni "steber" |
| 3. Katodni temni prostor | 7. Anodno tlenje |
| 4. Negativno tlenje | 8. Anodni temni prostor |

Slika 6a in b. Vpliv tlaka plinske mešanice na tlenje [3]

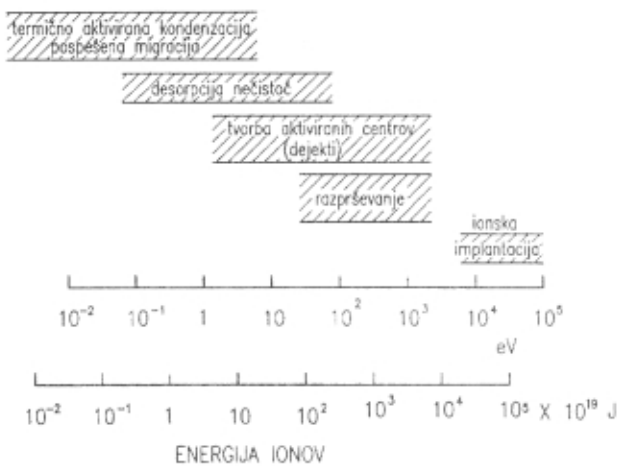


Slika 7. Votla katoda [2]

Nepravilno krmiljenje tlaka pri zelo razgibani obliki orodja ali pri orodjih, ki so postavljena preblizu skupaj, lahko usmeri tlenje v področje, kjer se tlenji nasprotnih površin dotikata ali prekrivata, ujeti ioni pa povzročijo močnejše obstreljevanje in višjo gostoto toka na lokalni površini. Posledica pojava votle katode je lokalno neenakomerno nitrirana plast ali segrevanje posameznih mest na orodjih ali strojnih delih na temperaturo, ki je nad 721°C. Za dušik je pojav votle katode upo-

števanja vreden, kadar produkt širine votline in tlaka pade pod 2,66 mbar.cm, gostota toka pa še naprej narašča, dokler širina ne postane primerljiva z debelino normalnega katodnega padca, ko tlenje ne prodira več v votlino. Ta zadnji pogoj omogoča možnosti enostavne mehanške maskiranja, s katerim preprečimo nitriranje, medtem ko se pojavu votle katode često izognemo s pravilno izbranim tlakom plina.

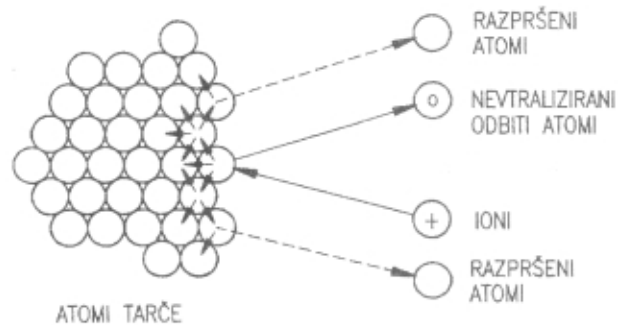
Druga pomembna lastnost tlivnega razelektrenja je razprševanje - ionsko jedkanje (ion sputtering). Ta pojav izkoriščamo pri čiščenju površin orodij pred nitriranjem. Pri postopku razprševanja uporabljamo argon ali vodik. Obstreljevanje površin orodja z ioni plina poteka pri nizkem tlaku, npr. 1.5 mbar, in visoki napetosti 700 V. Na ta način odstranimo morebitne nečistoče ali oksidno zaščitno plast pri nerjavnih jeklih s površin, ki jih želimo nitrirati. Ko obstreljujemo površino kovin z ioni, pride do različnih pojavov. O tem, kateri bo prevladal oziroma je sploh možen, odloča predvsem kinetična energija vpadlih delcev. Na sliki 8 so označeni nekateri važnejši pojavi na površinah v odvisnosti od energije ionov.



Slika 8. Energijska območja nekaterih važnejših pojavov pri obstreljevanju površin [3]

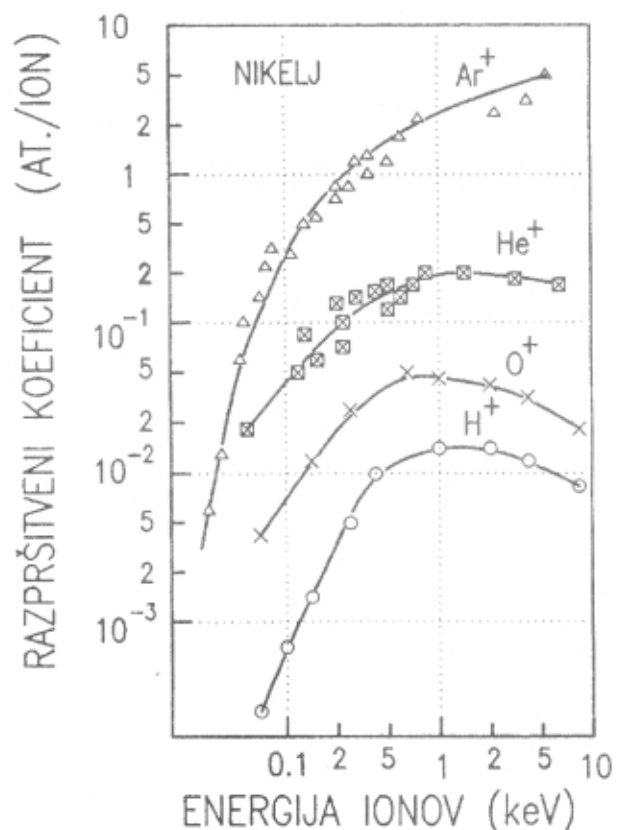
Pri delcih s kinetično energijo pod 6 eV je interakcija z orodji ali strojnimi deli omejena na prvo plast atomov na površini. V tem primeru so pomembni potencialna energija vpadlih delcev in z njo povezani elektronski prehodi ter preurejanje kemijskih vezi. Pojavi, ki prevladujejo, so desorpcija nečistoč, kemijske reakcije, polimerizacija itd. Če kinetična energija vpadlih ionov presega vezavno energijo atomov (ki je približno enaka sublimacijski energiji), pride pri preurejanju atomov do novega pojava - delci lahko odletijo s površine orodij ali strojnih delov. V splošnem lahko ugotovimo, da se potencialna energija vpadlih delcev porabi za elektronske interakcije, medtem ko gre kinetična energija v nihanje atomov mreže oziroma v njihove premike. Večji del energije vpadlih delcev se porabi za segrevanje orodij ali strojnih delov, manjši pa za razprševanje. Razprševanje je vedno povezano s površinsko migracijo atomov in s poškodbami mreže. V poenostavljeni sliki razprševanje

spominja na tridimenzionalno biljardno igro z atomi, v kateri se gibalna količina vpadlega iona prenaša na atome orodja. Shematično je mehanizem prikazan na sliki 9.



Slika 9. Trkovni procesi pri razprševanju - ionskem jedkanju (puščice označujejo prenos gibalne količine) [3]

Proces razprševanja opišemo z razpršitvenim koeficientom, ki pomeni povprečno število atomov, ki jih izbije en ion. Izkaže se, da je hitrost razprševanja odvisna od vrste materiala, od energije vpadlega delca, pa tudi od njegove mase in vpadnega kota. Na sliki 10 so prikazani razpršitveni koeficienti v odvisnosti od energije ionov.



Slika 10. Razpršitveni koeficient za različne ione [3]

2.3 Maskiranje in merjenje temperature

Maskiranje površin na delih, kjer nitiranje ni zaželeno, izvedemo hitro in poceni z uporabo tehnike mehanskega maskiranja. Rezultati so primerljivi po učinkovitosti z dragim in zamudnim postopkom elektropliranja, ki ga uporabljamo za maskiranje površin pri plinskem nitiranju. Mehanske maske v obliki plošč in valjev standardne velikosti imamo vedno na razpolago, v posebnih primerih uporabljamo tudi folijo iz nerjavnega jekla. Mehanske maske izbiramo tako, da se prilegajo na del površine orodja ali strojnega dela z režo, ki ni večja od 0,8 mm (pojav votle katode).

Temperaturo nitiranja merimo z dvema termoelementoma Ni-CrNi, ki ju namestimo tako, da merimo tudi temperaturo v jedru orodja ali strojnega dela, kadar koli je to mogoče. Pojav oblokov preprečujemo s kontrolnim sistemom, ki elektronsko nadzoruje razelektrivno napetost. Ta sistem zazna navzočnost lokalne neenakomernosti v gostoti toka ter v trenutku zmanjša ali prekine električni tok tako, da se ponovno lahko vzpostavi ravnotežne razmere.

3 Sklep

Ta članek daje le osnovno informacijo o postopku nitiranja v pulzirajoči plazmi, ki bo v pomoč širšemu krogu strokovnjakov različnih profilov pri načrtovanju orodij in strojnih delov vrhunske kakovosti, pri katerih je možno napovedati in zagotoviti njihovo vzdržljivost.

Nitiranje v pulzirajoči plazmi je najsodobnejši postopek nitiranja, ki je posebej prirejen za najzahtevnejšo kemotermično obdelavo orodij in strojnih delov, ki tovrstnim izdelkom poveča vzdržljivost za večkrat. Zasnova peči za nitiranje v pulzirajoči plazmi je prilagojena

potrebam slovenskega orodjarstva, ki je že danes močno prisotno na zahtevnih tujih tržiščih. Prodor in obstanek na teh tržiščih pa je v veliki meri odvisen od vrhunske kakovosti, rokov izdelave in cene orodij. Istočasno pa izbrana konfiguracija peči za nitiranje v pulzirajoči plazmi zaradi prožnosti omogoča tudi prodor na področje raziskav tehnike površin (surface engineering), ki je danes v orodjarstvu in pri izdelavi strojnih elementov nepogrešljiv dejavnik doseganja vrhunske kakovosti.

Dolgoletno intenzivno raziskovalno-razvojno delo na področju vakuumske toplotne obdelave, ki smo jo dopolnili še s kemotermičnim postopkom nitiranja v pulzirajoči plazmi, je z ustanovitvijo Centra za vakuumsko toplotno in kemotermično obdelavo (CVT & KTO) na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije (IMT) temelj, ki slovenskim orodjarjem omogoča doseganje vrhunske kakovosti orodij.

Okolje, v katerem center deluje, kadrovska zasedba in opremljenost laboratorijev IMT ter zasnova CVT&KTO dolgoročno zagotavljajo kontinuiteto raziskovalno-razvojnega dela na področju optimiziranja različnih vrst toplotne obdelave in tehnike površin (surface engineering) ter kakovosten prenos rezultatov v prakso.

4 Literatura

- 1/1. Alfred Grill, Cold Plasma in Materials Fabrication, IEEE PRESS, New York 1993
- 1/2. Pasmafion nitriding™ Process manual, Heat-Vac Systems Division of Consarc Corporation, Scotland
- 1/3. A. Žabkar, Mehanizmi nanašanja tankih plasti v plazmi, Institut J. Stefan, Univerza v Ljubljani
- 1/4. W. Kovacs, W. Russell, An introduction to ion nitriding, Elatec Inc. Woburn, Massachusetts, USA

Srečanje raziskovalcev s področja optičnih interferenčnih prekritij 5.-9. junij 1995, Tucson, Arizona, ZDA

V Tucsonu, mestu na jugu Arizone, blizu (cca 100 km) mehiške meje, smo se v začetku junija letos srečali strokovnjaki, ki se ukvarjamo z optičnimi prekritji. Srečanje je organizirala OSA (Optical Society of America) s pomočjo SPIE (International Society of Optical Engineering), EOS (European Optical Society) in SVC (Society of Vacuum Coaters).

Udeležencev srečanja, šestega po vrsti, je bilo približno 250 s celega sveta, od tega več kot polovica Američanov. Poleg 25 vabljenih predavanj, ki so bila večinoma pregledna, je bilo predstavljenih še 125 prispevkov s pet minutnim govornim delom kot uvodom h kasnejši posterski predstavitvi. Program srečanja je bil razdeljen na naslednje teme: Teorija in oblikovanje prekritij, Nanos optičnih prekritij (v glavnem vakuumski postopki nanašanja), Karakterizacija, Materiali in Uporabe optičnih prekritij. Vsak dan je bil namenjen drugi temi. Zadnji dan, petek, pa je bil namenjen izbranim vabljenim predavanjem.

Srečanje je spremljala majhna razstava, ki so jo pripravila podjetja iz Arizona Optics Industry Association. V združenje je včlanjenih več kot 115 podjetij (npr. Wyko - metrologija in software, Photometrics - CCD kamere in sistemi, IBM - optični pomnilniki, Dataforth - modemi in multipleksi za optična vlakna, Boeckeler Instruments - mikroskopi in precizna merilna oprema, Lightpath Technologies - steklo z gradientnim lomnim količnikom, Coherent, Hughes), ki tvorijo t.i. Optics Valley v Tucsonu. Včlanjena je tudi univerza iz Arizone, Optical Science Center iz Tucsona, ki je poleg univerze v Rochesteru, NY drugi najmočnejši center za optiko v ZDA.

Srečanje je bilo v prijetnem rekreacijskem centru Loews Ventana Canyon Resort sredi puščave z ogromnimi, več kot sto let starimi kaktusi saguaro, tako da je teden dni, kljub vročini 40°C, prehitro minil.

mag. Andrej Demšar
Fotona d.d.
Ljubljana

PREGLED METOD ZA PRIPRAVO TRDIH PREVLEK

Peter Panjan in Boris Navinšek, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

Review of vapour-phase coating processes for hard coatings

ABSTRACT

Hard coatings can be deposited by a large variety of techniques. Generally they can be divided in three groups: Chemical Vapour Deposition (CVD), Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition (PACVD) and Physical Vapour Deposition (PVD). The basic of these techniques, a comparison of individual technologies, their possibilities, advantages and limitations are presented.

POVZETEK

Za pripravo trdih prevlek obstaja veliko različnih metod. V splošnem jih lahko razdelimo v tri skupine: kemijsko depozicijo iz parne faze (CVD), kemijsko depozicijo iz parne faze v prisotnosti plazme (PACVD) in fizikalno (vakuumsko) depozicijo iz parne faze (PVD). V prispevku opisujemo osnove teh postopkov, njihove prednosti in omejitve, naredila pa sva tudi primerjalno analizo posameznih metod.

1. Uvod

Oplemenjenje površin orodij, strojnih delov in nekaterih končnih izdelkov s trdimi zaščitnimi prevlekami, ki jih danes najpogosteje pripravimo s fizikalnimi (vakuumskimi) postopki nanašanja (PVD), ni nova ideja. Že dolga desetletja so v rabi različni postopki za zaščito in poboljšanje lastnosti površin, kot so trdo kromanje, kemotermične obdelave (nitiranje in karbonitriranje), obdelave v plazmi, anodna oksidacija, boriranje in vanadiranje ter še mnogi drugi. Osnova teh postopkov so spremembe kemične sestave in mikrostrukture na površini z elektrolizo, difuzijo ali kemijsko reakcijo, skratka procesi, ki vodijo do spremembe sestave in strukture osnovnega materiala. Izboljšanje kvalitete (vzdržljivosti) orodij, ki jih dosežemo s temi postopki je največ nekaj deset procentov, medtem ko dobimo s trdimi prevlekami tudi do desetkrat večjo vzdržljivost orodja. Za pripravo trdih prevlek je primernih cela vrsta keramičnih materialov. Pripravimo pa jih lahko z različnimi postopki nanašanja iz parne faze, ki jih bova v nadaljevanju podrobneje opisala.

2 Kemijsko nanašanje iz parne faze

Prve trde prevleke so bile narejene pred več kot trideset leti s kemijskim postopkom nanašanja iz parne faze (Chemical Vapour Deposition - CVD) /1,2/. Postopek se še danes uporablja za oplemenjenje rezalnih ploščic iz karbidne trdine s trdimi prevlekami TiN, TiC, TiCN, Al₂O₃ in z večplastnimi strukturami na osnovi naštetih prevlek. Bistvo postopkov CVD za pripravo trdih prevlek je kemijska reakcija med izbranimi plini na vroči podlagi (800 do 1100°C). Reakcija je lahko termični razkroj (piroliza), substitucija ali dvojna substitucija. Klasičen primer dvojne substitucije je nanašanja plasti TiN po shemi:



Tlak v reaktorski posodi je lahko atmosferski, ponavadi pa je nekoliko znižan, ker na ta način izboljšamo kvaliteto in uniformnost prevleke na podlagah z veliko površino.

Kvaliteta prevleke je odvisna tudi od čistosti površine podlage, kompatibilnosti prevleke in podlage, termodinamike in kinetike same reakcije. Termodinamične količine, ki jih lahko kontroliramo so: temperatura podlage, celotni tlak in delni tlaki reaktantov. Ravnotežni parni tlak pri izbrani temperaturi lahko izračunamo iz proste energije za izbrano reakcijo. CVD postopek nanašanja prevlek je zaporedje naslednjih procesov: (1) uparitev snovi, ki so potrebne za reakcijo, (2) transport plina do podlag, (3) adsorpcija, (4) razgradnja adsorbirane faze, (5) nanašanje prevleke izbranega materiala in desorpcija plinskih produktov, ki med reakcijo nastanejo, in (6) odstranitev teh plinov iz reaktorja. 1, 2 in 6 so transportni procesi, 2,3,4 in 5 pa reakcije na površini podlage. Transportni procesi so v splošnem odvisni od koncentracije reaktantov, difuzijske hitrosti, pretoka plinov in geometrije reaktorja. Hitrosti reakcij na površini pa so odvisne predvsem od koncentracije reaktantov in temperature.

Mikrostruktura CVD prevlek je odvisna od temperature podlage in prenasičenosti pare snovi. Pri nižjih temperaturah imajo prevleke amorfnost strukturo, z naraščajočo temperaturo podlage pa nastajajo najprej finostrukturne polikristalne plasti, nato grobostrukturne polikristalne, dendritne, pri dovolj visokih temperaturah pa rastejo epitaksono. Vpliv prenasičenosti na mikrostrukturo prevlek je ravno obraten.

Reakcije potekajo v termodinamičnem ravnotežju, kar olajša pridobivanje spojin v stehiometričnem razmerju. Prednosti postopkov CVD nanašanja plasti sta tudi razmeroma preprosta reaktorska posoda in enostavna kontrola postopka. Poglavitne slabosti postopkov CVD pa so visoka temperatura nanašanja ter omejena izbira kemijskih reakcij v plinski fazi, ki so primerne za pripravo trdih prevlek. Tudi nekateri stranski produkti reakcij so nezaželeni (npr. HCl), ker lahko poškodujejo podlago in ker so izpušni plini ekološko nesprejemljivi. Kot izhodne snovi nam v večini primerov rabijo halogenidi prehodnih elementov, ki pa so hlapljive spojine, zelo občutljive na vlago, in delo z njimi zahteva posebne varnostne ukrepe.

Zaradi visoke temperature nanašanja so se postopki CVD dolgo uporabljali le za zaščito orodij iz karbidne trdine. Šele pred nekaj leti so bili razviti postopki, ki potekajo v plazmi (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition - PACVD)/3,4,5,6,7,8./; s plazemsko aktivacijo reakcijskih plinov se temperatura, potrebna za potek kemijske reakcije, zniža na 550°C za TiC oz. 300°C za TiN in TiCN. Razelektritev v reaktorju dosežemo, če tlak plinske mešanice znižamo na nekaj mbar, vzbudimo pa jo lahko na več načinov: (a) z negativno elektrodo, ki se nahaja v posodi nasproti podlagam, (b) z indukcijsko tuljavo, ki jo vzbujamo z visoko frekvenco, (c) s kapacitivnim vzbujanjem in (d) z mikrovalovnim vzbujanjem. Način vzbujanja plazme izberemo glede na geometrijo podlag in reaktorja. Plazmo zgostimo ali jo usmerimo proti podlagam z magnetnim poljem. Največjo gostoto plazme dosežemo z mikrovalovnim vzbujanjem, slaba stran postopka pa je visoka cena mikrovalovnega generatorja.

V zadnjih letih so raziskovalci nevarne halogenide nadomestili s kovino-organskimi spojinami (govorimo o "Metal Organic Chemical Vapour Deposition - MOCVD" postopku) /9/. Kovino-organske spojine lahko pripravimo skoraj za vse kovinske elemente, vendar pa je cena teh spojin visoka. Slaba stran postopka je tudi neizogibna prisotnost ogljika (in v nekaterih primerih kisika) v plasti.

3 Fizikalni (vakuumski) postopki nanašanja

Konec sedemdesetih let je razvoj fizikalnih (vakuumskih) postopkov nanašanja (Physical Vapour Deposition - PVD) omogočil nanašanje prevlek TiN na orodja iz hitroreznih jekel pri temperaturah pod 500°C, t.j. pri temperaturi, ki je nižja od temperature popuščanja teh jekel /10,11/. Ta zahteva je bistvena, saj se na ta način izognemo popuščanju jekla in izgubi dimenzijskih toleranc. Osnova vseh postopkov PVD nanašanja trdih prevlek sta reaktivno napajanje in napršenje ob prisotnosti plazme, s katero aktiviramo (disociiramo, vzbudimo ali ioniziramo) atome tarče, reaktivnega plina oz. inertnega plina. Govorimo o aktiviranem reaktivnem nanašanju (Activated Reactive Physical Vapour Deposition - ARPVD). Podlage (orodja) so na negativnem električnem potencialu (bias-u), ki nastale ione pospeši na površino rastoče plasti. Tak postopek nanašanja se imenuje ionsko prekrivanje (Ion Plating - IP)/12,13,14/. Bistvo ionskega prekrivanja je torej obstreljevanje rastoče plasti z ioni iz plazme. Plazma je v nekaterih sistemih že prisotna (napršenje, napajanje s katodnim lokom), medtem ko jo moramo pri drugih ustvariti (enostavno ionsko prekrivanje). Odločilna je gostota plazme, energija pa mora biti dovolj velika, da pride do vzbujanja in ionizacije prisotnih nevtralnih atomov oz. molekul, vendar pa ne prevelika, ker lahko ioni z veliko energijo poškodujejo plast/15/. Izmed načinov vzbujanja plazme je najstarejši postopek, t.j. istosmerna razelektrotev med dvema elektrodama, komajda zadosten, zato plazmo praviloma zgostimo z magnetnim poljem. Zelo učinkovit postopek je vzbujanje plazme z mikrovalovi (gostota ionov, ki jo dosežemo je do 10^{11} ionov/cm³) /16/. Velik tehnični problem pa je, kako z mikrovalovi ustvariti plazmo v veliki vakuumski posodi.

Pojem "reaktivni" postopek nanašanja (reaktivno napajanje, reaktivno napršenje) pomeni, da tarčo čiste kovine ali zlitine izparevamo ali razpršujemo v atmosferi reaktivnega plina (npr. dušika, acetilena, kisika) /17,18,19,20,21/. Pri pravilno izbranih parametrih priprave raste na podlagi tanka plast ustrezne spojine (npr. TiN, CrN, TiC,...). Sestava in lastnosti plasti so odvisne od hitrosti razprševanja, razdalje med tarčo in podlago, temperature podlage, tlaka argona in reaktivnega plina, gostote toka izparjenih oz. razpršenih atomov tarče ter stopnje ionizacije argona, reaktivnega plina in izparjenih oz. razpršenih atomov tarče /22,23,24,25,26/. Tak način priprave tankih plasti različnih spojin ima v primerjavi z nanašanjem iz kompozitne tarče več prednosti: (a) hitrost nanašanja je veliko večja, (b) cena tarče je veliko manjša, (c) toplotna prevodnost kovinske tarče je veliko večja, zato jo (pri napršenju) lažje hladimo.

Različni postopki ionskega prekrivanja, ki so danes v uporabi, se razlikujejo tako po načinu uparitve atomov tarče, kakor tudi po tem, kako, kje in v kolikšni meri izparjene kovinske atome, atome (molekule) reaktivnega

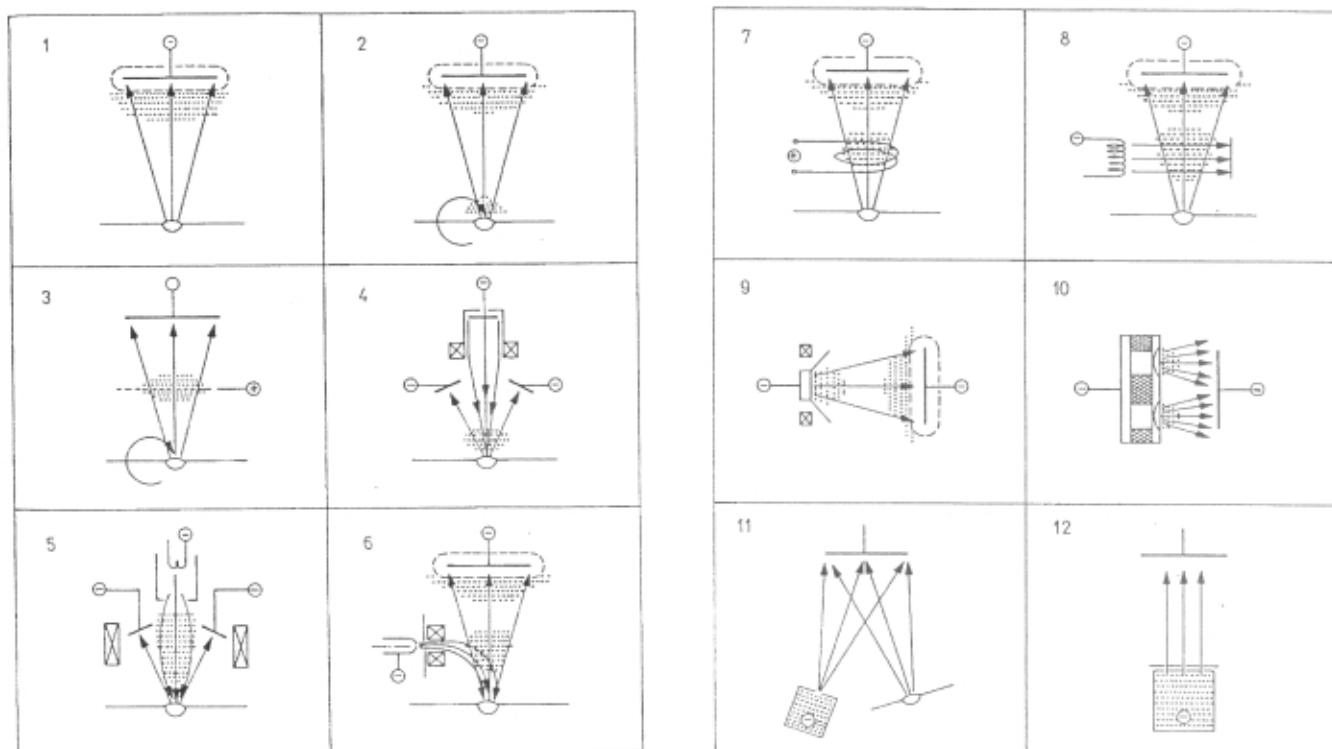
plina in atome delovnega (inertnega) plina (argona) aktiviramo (t.j. disociiramo, vzbudimo ali ioniziramo).

Postopek nanašanja trdih prevlek PVD poteka v treh korakih: (a) uparitve atomov kovinske tarče, (b) transporta atomov ali gruče atomov (nevtralnih in ioniziranih) na podlage, (c) kondenzacije curka atomov na podlagah in rast plasti. Atome tarče (izvira) lahko uparimo: (a) s segrevanjem z elektronskim curkom, katodnim lokom ali laserjem (napajanje) in (b) z obstreljevanjem tarče z inertnimi ioni (razprševanje) - vsak vpadli ion izbije iz tarče določeno število atomov; število razpršenih atomov je odvisno od vrste tarče ter od vrste, energije in vpadnega kota ionov. Postopki uparitve atomov izvira se razlikujejo: (a) po energiji uparjenih atomov (pri napršenju je povprečna energija razpršenih atomov 1-10 eV, pri napajanju 0.1 eV, energija ionov pa je določena z električnim potencialom na podlagah - "bias-om" (-100 do -200 V), (b) po stopnji ionizacije izparjenih atomov (navečja, t.j. >50%, je pri nanašanju s katodnim lokom) in (c) po hitrosti nanašanja (od 10 do 70 nm/min).

Uparjeni atomi in molekule na hladnejši podlagi se kondenzirajo v obliki tanke plasti /27/. Gonilna sila procesa je prosta energija kondenzacije (ΔG_{kon}), ki je premoso-razmerna logaritmu prenasičenosti P (P je razmerje tlaka curka uparjenih atomov (p_1) in ravnotežnega tlaka (p_2) pri temperaturi kondenzacije, t.j. temperaturi podlage T_p): $\Delta G_{kon} = -RT_p \ln P$. Za kinetiko kondenzacije vakuumskih tankih plasti (PVD) pa je zelo pomembna količina temperatura kondenzacije (t.j. temperatura podlage); vakuumske tanke plasti lahko nastanejo le pri občutni podhladitvi, to je pri razliki med tališčem snovi, ki jo nanašamo, in temperaturo kondenzacije.

Če sta torej izpolnjena osnovna termodinamska pogoja, se pričnejo atomi in molekule uparjene snovi kondenzirati na podlagi. Proces, ki so pomembni v začetni fazi kondenzacije, t.j. pri nukleaciji, so adsorpcija, odparevanje (desorpcija) in difuzija adsorbiranih atomov depozita po površini podlage, tvorba stabilnih jeder in njihova koalescenca /28/. Atomi depozita, ki priletijo na podlago, imajo presežek kinetične energije in se pri višjih temperaturah podlage gibljejo po njeni površini ali pa z nje odparijo, še preden pridejo do ugodnih mest za trajno adsorpcijo. Takšna mesta so razne napake na površini podlage ali večji skupki depozita, ki imajo zaradi večje mase večjo desorpcijsko energijo. Nukleacija tankih plasti je odvisna od razmerij naslednjih treh medatomskih vezavnih energij: (a) izparilne energije snovi (E_{izp}) iz katere nastane tanka plast, preračunane na en atom (to je energija kemijske vezi med atomi te snovi); (b) aktivacijske energije desorpcije (E_{des}), posameznega atoma depozita s podlage, ki podaja energijo kemijske vezi med atomi depozita in atomi podlage; (c) aktivacijske energije difuzije (E_{dif}) oz. selitve posameznega atoma depozita po površini podlage. Plasti rastejo otokasto (Volmer-Webrov mehanizem), če so vezne sile med atomi in molekulami depozita veliko močnejše od veznih sil med temi atomi in atomi podlage in dvodimenzionalno (Frank-van der Merwejev mehanizem), če so slabše.

Na sliki 1 je shematsko prikazano nekaj značilnih postopkov ionskega prekrivanja /29/. Pri t.i. enostavnem ionskem prekrivanju kovinski atomi, ki izparevajo iz izvira, ionizirajo pri prehodu skozi področje katodne plazme, ki jo ustvarimo posebej v ta namen. Stopnja ionizacije



Slika 1. Shematični prikaz postopkov ionskega prekrivanja, ki se uporabljajo za pripravo trdih prevlek /45/ (črtkano je označeno področje plazme): 1 - enostavno ionsko prekrivanje, 2 - ionsko prekrivanje z elektronskim curkom, 3 - aktivirano reaktivno naprejevanje, 4 - ionsko prekrivanje z votlo anodo, 5 - aktivirano reaktivno naprejevanje z napetostjo na podlagah, 6 - ionsko prekrivanje z lokom iz votle katode, 7 - RF-aktivirano ionsko prekrivanje, 8 - tetrodni sistem za ionsko prekrivanje, 9 - nanašanje s katodnim lokom, 10 - magnetronsko naprševanje, 11 - ionsko mešanje z ionskim curkom, 12 - nanašanje z ionskim curkom

kovinskih atomov je zelo majhna (0.1 do 1 %). Kadar naprejevamo z elektronsko puško, potem so vpadni elektroni tisti, ki ionizirajo kovinske in dušikove atome, vendar je bistvena razlika med visoko- in nizkonapetostno elektronsko puško; nizkoenergijski elektroni močneje ionizirajo plin.

Dodatno razelektritev v sistemu lahko ustvarimo z RF (radiofrekvenčnim) generatorjem - govorimo o aktiviranem ionskem prekrivanju /30/.

Visoko stopnjo ionizacije dosežemo, kadar izvir segrevamo z nizkonapetostnim (nekaj 100 V) in zelo močnim (100 A) elektronskim curkom /19,31/. Po tem principu deluje Balzersova naprava BAI 730 v Centru za trde prevleke v Domžalah, ki sem jo uporabil za pripravo nekaterih vzorcev s prevleko TiN. Napravo odlikuje visoka stopnja ionizacije ($2-5 \times 10^{14}$ ionov/cm³, tj. ≈50%), velika hitrost nanašanja (1-15 nm/s), velika ponovljivost, visoka kvaliteta prevlek in fleksibilnost naprave.

Atome kovinske tarče lahko uparimo tudi z nizkonapetostnim in močnim katodnim lokom/32,33/. Izvir materiala je ena ali več katod. Z močno iskro, ki naključno potuje po površini katode, dobimo lokalno staljena področja z gosto kovinsko plazmo, iz katere izpareva material. Stopnja ionizacije je izjemno velika (od 30 do 100%). Slaba

stran te metode pa je, da iz tarče poleg posamičnih atomov izparevajo tudi gručaste atome, zato je mikrostruktura tako pripravljenih plasti kapljčasta. Ideja za uporabo točkastega katodnega loka za pripravo trdih prevlek je prišla iz bivše SSSR (t.i. "PUSK" sistem). Licenco so odkupili ameriški podjetji MULTI-ARC in VAC-TEC ter INTERATOM iz Nemčije.

Pri magnetronskih napravah /34,35/ za pripravo trdih prevlek je odličen aktivacijski medij gosta plazma, ki je z magneti osredinjena v bližini tarče. Čeprav se magnetronsko naprševanje že dolgo časa uporablja za pripravo dekorativnih prevlek na osnovi TiN in drugih trdih prevlek ter difuzijskih zapor v mikroelektroniki, pa se pri pripravi trdih prevlek za zaščito orodij ni uveljavilo. V konvencionalnih magnetronih je plazma zgoščena v prostoru pred tarčo, zato je gostota toka ionov na podlage majhna. Tako pripravljene plasti so zato preveč porozne, imajo stebričasto mikrostrukturo, pa tudi oprijemljivost na podlagi je slaba. Problem je bil rešen šele pred nekaj leti, ko je bil razvit t.i. "unbalanced" magnetronski sistem /36,37,38/. Bistvo tega sistema je povečana gostota plazme v bližini podlag (orodij), kar dosežemo z asimetrično namestitvijo permanentnih magnetov. Ta izpopolnjena tehnika omogoča nanos gostih plasti, brez stebričaste mikrostrukture in z močno adhezijo na pod-

lago. Velika prednost magnetronskega naprševanja je v možnosti enostavne priprave večkomponentnih trdih prevlek (npr. TiAlN), saj lahko za izvir uporabimo kar zlitino z ustrežno sestavo.

V praksi se uporabljajo tudi naprave, ki namesto visokonapetostne in nizkotokovne elektronske puške uporabljajo nizkonapetostni in visokotokovni izvir elektronov, ki ga poznamo pod imenom votla katoda (hollow cathode) /39,40/. Stopnja ionizacije je lahko večja od 50%. Komericalne naprave te vrste je razvilo japonska podjetje Ulvac.

Narejenih je bilo tudi več poskusov nanašanja trdih prevlek z laserjem /41,42/. Za uspešno nanašanje potrebujemo npr. pulzno delujoči XeCl (valovna dolžina 308 nm) ali ArF (193 nm) eksajmerski laser. Potrebna gostota energije za napajanje, npr. TiN, je 4-5 J/cm², čas trajanja enega pulza okrog 40 ns, število pulzov pa okrog 100 na sekundo. Prednost priprave trdih prevlek z laserskim curkom je nizka temperatura nanašanja (<70°C), slabost pa predvsem majhna površina podlag, na katere lahko naneseemo homogeno plast.

Namesto razelektritve, ki zahteva relativno visok delovni tlak argona, so lahko izvir ionov ionske "puške" (ionski

izviri s širokim snopom) /43,44/. Obstreljevanje plasti z nizkoenergijskimi ioni in nevtralnimi delci z veliko energijo (od nekaj eV do nekaj keV) zelo izboljša oprijemljivost in mikrostrukturo prevlek. Ionski curek pa lahko uporabimo tudi za naprševanje prevlek.

Naprave za ionsko prekrivanje se razlikujejo tudi po načinu segrevanja podlag (segrevamo lahko z elektroni, ioni ali infra grelniki) in po načinu čiščenja podlag pred nanosom prevleke (jedkanje z ioni argona ali s kovinskimi atomi).

4 Sklepi

Meja med kemijskimi in fizikalnimi (vakuumskimi) postopki nanašanja se je v zadnjem desetletju močno zabrisala. Sestavni del kemijskih postopkov je postala plazma, medtem ko so osnova modernih fizikalnih metod vse bolj zapletene kemijske reakcije /45/.

V tabeli 2 so izpisane bistvene lastnosti kemijskih, fizikalno-kemijskih in fizikalnih postopkov nanašanja trdih prevlek. V tabeli 3 pa je narejena primerjava med fizikalnimi (vakuumskimi) postopki, ki temeljijo na napajevanju oz. na naprševanju.

Tabela 2. Značilne lastnosti kemijskih (CVD), fizikalno-kemijskih (PACVD) in fizikalnih (PVD) postopkov nanašanja trdih prevlek.

	CVD	PACVD	PVD/ARPVD
Izhodne snovi	hlapljiv halogenid ali kovino-organske spojine, reaktivni in nevtralni plini	iste kot pri CVD	kovinska tarča ali elektroda, reaktivni in nevtralni plini
Tlak v reaktorju	60 Pa - 0.1 MPa	10-100 Pa	0.1-1 Pa
Temperatura podlage	800-1000°C	250-450°C	250-450°C
Hitrost nanašanja	0.2-3 µm/min	10-50 nm/min	20-80 nm/min
Povprečna energija atomov oz. molekul	termična	termična	pri napajevanju: termična (0.2 eV), naprševanje: 1-10 eV
Transport atomov od izvira do podlage	laminarni tok in difuzija	laminarni tok in difuzija	molekularni tok (prosta pot je pri napajevanju večja od razdalje izvir-podlaga, pri naprševanju pa manjša, zato atomi doživijo več trkov z atomi plina)
Enakomernost nanosa plasti	odlična	dobra	slaba; potrebno je vrtenje podlag okrog izvira ali uporaba več izvirov
Prednost postopka	nanašanje pri atm. tlaku, kar omogoča prekrivanje votlin (odprtini) v podlagah; enostavno spreminjanje sestave, velika hitrost nanašanja, enostavno nizka cena naprave	nizke temperature nanašanja, večja reaktivnost, čistejša in gostejše plasti	nizke temperature nanašanja, "čista" metoda, možnost sinteze nestehiometričnih spojin
Slabe strani postopka	pogosto strupene in na zraku neobstoje snovi, ki jih potrebujemo za sintezo, visoka temperatura nanašanja, nekompatibilnost s številnimi podlagami, strupeni izpušni plini	pogosto strupene in na zraku neobstoje snovi, ki jih potrebujemo za sintezo, strupeni izpušni plini	drage naprave za nanos, spreminjanje sestave prevlek je vezano na menjavo dragih tarč ali izvirov

Tabela 3. Primerjava osnovnih fizikalnih lastnosti naprevanja in naprševanja

Naprevanje	Naprševanje
Uparitev atoma depozita	
1. S segrevanjem z elektronskim curkom, katodnim lokom ali laserjem	1. Ionsko obstreljevanje
2. Energija izparjenih atomov: $E=0.1$ eV pri 1200K	2. Energija razpršenih atomov: $E=1-10$ eV
3. Hitrost napar. ($M=50$, $T=1500K$ in $P=10^{-3}$): $\approx 1.3 \times 10^{17}$ at./cm ² s	3. Hitrost naprševanja (pri 1 mA/cm ² in $Y = 2$ at./ion) $\approx 3 \times 10^{16}$ at./cm ² s
4. Kotna porazdelitev izparjenih atomov je kosinusna	4. Pri velikih hitrostih naprševanja je kotna porazdelitev razpršenih atomov kosinusa
5. Disociacija spojin, razgradnja zlitin, sestava plasti odstopa od sestave snovi v izviro	5. Delna disociacija spojin, sestava plasti ustreza sestavi tarče
Plinska faza	
1. Izparjeni atomi potujejo v visokem ali ultra visokem vakuumu ($\sim 10^{-4}-10^{-6}$ Pa)	1. Delovni tlak argona (0.1-1 Pa)
2. Prosta pot je večja od razdalje med podlago in izviro	2. Prosta pot je manjša od razdalje med tarčo in podlago, zato razpršeni atomi na poti o podlag doživijo več trkov
Kondenzacija plasti	
1. Atomi, ki se kondenzirajo, imajo relativno nizko energijo	1. Atomi, ki se kondenzirajo, imajo relativno visoko energijo
2. Vgrajevanje atomov plina zanemarljivo	2. V plast se vgradi do nekaj at% atomov plina (argona)
3. Relativno velika kristalna zrna	3. Plasti imajo finoizmatno strukturo
4. Plasti rastejo s preferenčno orientacijo	4. Plasti so brez izrazite teksture
	5. Dobra oprijemljivost plasti na podlago

Ko izbiramo postopek nanašanja trdih prevlek, moramo upoštevati naslednje:

1. Nimamo optimalnega procesa za nanašanje trdih prevlek
2. Postopek nanašanja izberemo glede na vrsto orodja, ki ga želimo prekrito
3. Najboljše rezultate dosežemo z napravami, ki imajo vgrajen nizkonapetostni elektronski lok ali pa več točkastih katodnih lokov
4. Fleksibilnost naprave (t.j. možnost istočasnega nanašanja trdih prevlek na orodja z najrazličnejšo geometrijo in velikostjo) mora biti čim večja
5. Ekonomičnost naprave je v največji meri odvisna od njene produktivnosti, t.j. delovne prostornine, hitrosti nanašanja, hitrosti segrevanja in hitrosti ohlajanja

5 Literatura

/1/ B. Bhushan, B.K.Gupta, Handbook of Tribology, McGraw-Hill, Inc., Chap. 9, New York, 1991, 9.84-9.102
 /2/ H.K.Pulker, Verschleiss-Schutzschichten unter Anwendung der CVD/PVD-Verfahren, Expert Verlag, Sindelfingen, 1985

/3/ A.I.Koren, Surface and Coat. Technol., 33 (1987), 31
 /4/ K.T.Rie and C.Brink, Proceed. of First Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen, 1988
 /5/ H.P.Lorentz, Proceed. of First Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen, 1988
 /6/ D.H.Jang, S.B.Kim and J.S.Chun, Proceed. of First Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen, 1988
 /7/ L. Shizhi, S.Yulong, X.Xiang and Y.Hongshun, Proceed. of First Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen, 1988
 /8/ J.Laimer, H.Störi and P.Rödhammer, J.Vac.Sci.Technol., A7 (5) (1989), 2952
 /9/ K.T.Rie and A.Gebauer, Materials Science and Engineering, A139 (1991), 61-66
 /10/ K.Reichelt and X.Jiang, Thin Solid Films, 191 (1990), 91-126
 /11/ J.Laimer, Vacuum, 40, 1/2 (1990) 27-32
 /12/ D.M.Matox, J.Appl.Phys., 34 (1963), 2493
 /13/ T.Spilvins, J.Vac.Sci.Technol., 17 (1), Jan/Feb 1980, 315
 /14/ H.Freller, Vacuum, Vol.45, N10/11, (1994), 997
 /15/ R.F.Bunshah and C.V.Deshpanndey, J.Vac.Sci.Technol. A3, (3), May/Jun 1985, 553
 /16/ F.Michel and et al., Rev.Sci. Instruments, 59 (1988), 1072

- /17/ R.F.Bunshah and C.Deshpandey, Physics of Thin Films, Vol.13, Academic Press, 1987, 59
- /18/ W.D.Westwood, Physics of Thin Films, Vol.14, Academic Press, 1989, 1-79
- /19/ W.D.Sproul, Surface and Coat. Technol., 33 (1987), 73-81
- /20/ H.K.Pulker, J.Vac.Sci.Technol. A 10(4), 1992
- /21/ P.Panjan in A.Cvelbar, Vakuumist, 26 (1992), 15-18
- /22/ S.Berg, T.Larson, C.Nender and H.O.Blom, J.Appl.Phys. 63, 63 (1988), 887
- /23/ S.Hofmann, Thin Solid Films, 191 (1990) 335-348
- /24/ J.N.Avaritsiotis and C.D.Tsiogas, Thin Solid Films, 209 (1992), 17-25
- /25/ G.M.Rao and S.Mohan, 42, 8/9 (1991) 515
- /26/ P.S.McLeod, Solid State Technology, Oct. 1983, 207
- /27/ E.Kansky, Nastajanje in rast vakuumskih tankih plasti, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Ljubljana, 1990
- /28/ K.Reichelt, Vacuum, 38/12 (1988) 1083-1099
- /29/ B.Zega, Zbornik radova 4. jug. simpozija o toplinskoj obradi metala, Plitvička jezera, 1986
- /30/ R.F.Bunshah, Proceed. of IX Int. Vacuum Congress, Madrid, 1983
- /31/ E.Moll, R.Buhl, H.K.Pulker and E.Bergman, Surface and Coatings Technol., 39/40 (1989), 475
- /32/ A.I.Grigorov, M.D.Kiselev, A.M..Dorodnov, Patent DE 2902142, 1978
- /33/ H.Randhawa and P.C.Johnson, Surface and Coatings Technol., 31 (1987), 303-318
- /34/ B.Zega, US Pat. 4, 374, 722 (1983)
- /35/ J.C.Vossen, W.Kern, ed., Thin Film Processes, Academic Press, New York, 1978
- /36/ B.Window and Sawwides, J.Vac.Sci.Technol., A4 (1986), 453
- /37/ D.G.Teer, Surf.Coat.Technol., 36 (1988), 901
- /38/ S.Kadlec, J.Musil and W.D.Münz, J.Vac.Sci.Technol., A8 (3), May/Jun 1990, 1318
- /39/ F.J.R.Morley, H.R.Smith, J.Vac.Sci.Technol., 9 (1972), 1377
- /40/ S.Komiyama, K.Tsurvoka, Jap.J.of Appl.Phys., Suppl.2/1 (1974), 415
- /41/ N.Biunno, J.Narayan, S.K.Hofmeister, A.R.Srivatsa and R.K.Singh, Appl.Phys.Lett. 54 (16) (1989), 1519-1521
- /42/ O.Auciello, T.Barnes, S.Chevacharoenkul, A.F.Schreiner and G.E.McGuire, Thin Solid Films, 181 (1989), 65-73
- /43/ S.Horita, T.Tujikawa, H.Akahori, M.Kobayashi and T.Hata, J.Vac.Sci.Technol. A 11(5) Sep/Oct 1993, 2452-2456
- /44/ W.Ensinger, B.Rauschenbach, Nucl. Inst. and Methods in Phys. Research B80/81 (1993), 1409-1414
- /45/ B.Zega, Zbornik XI. jug. vakuumskega kongresa, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Gozd Martuljek, 1990, 129-143

STROKOVNE EKSKURZIJE

Na sejah I.O. smo v zadnjih letih večkrat obravnavali možnosti ogleda zanimivih tovarn, tehnologij in raziskovalno razvojnih institucij doma in na tujem. Ker je težko uskladiti dogovor med tovarno in kandidati za udeležbo, medtem ko še ni znano niti število udeležencev niti datum izvedbe, želimo ugotoviti vsaj približno število interesentov.

Zato naprošamo bralce, da nam javijo, katere od spodaj naštetih ekskurzij (za katere že potekajo prva povpraševanja s strani DVTS) bi se najraje udeležili. Najbolj zaželeno označite z 1 ostale z 2, 3 in 4.

- A - Acroni (Jesenice) - metalurgija, plini
- B - Messer Griesheim (Ruše) - plinska tehnika
- C - Varian (Torino) - visokovakuumski elementi in sistemi
- D - vaš predlog

Glede na število preliminarne prijave bomo najprej (letos jeseni) pripravljali tisti ogled, za katerega bo največ zanimanja. Podatek o številu interesentov je pomemben tako za dogovor o obisku kot tudi za organizacijo prevoza. Prosimo, da nam javite vaš točen naslov, kamor vam bomo sporočili informacijo o datumu in pogojih ogleda, ko bo le-ta dokončno dogovorjen. Odgovore pošljite na naslov:

DVTS
Spruk Sonja ali Koller Lidija
Teslova 30
61111 LJUBLJANA
(tel.263-461 int. 251 ali 258)

A.P.

Naročnike Vakuumista prosimo, da čim prej poravnate naročnino za leto 1995.

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

ZGODOVINA POSPEŠEVALNIKOV: Od idej do prvih izvedb

Stanislav Južnič*

HYSTORY OF ACCELERATORS: From ideas to their first realisation

POVZETEK

V razpravi povzemamo zgodovino pospeševalnikov od idej v prejšnjem stoletju do prvih izvedb. Posebno pozornost posvečamo štiridesetletnici Van de Graaffovega pospeševalnika in betatrona na Institutu Jožef Stefan.

ABSTRACT

We deal with the history of accelerators from ideas in the past century, to their first realisation. The 40th anniversary of the Van de Graaff accelerator and the betatron of the Jozef Stefan Institute in Ljubljana is emphasized.

Uvod

Pred sedemdesetimi leti je prišlo do napete tekme v pospeševanju protonov do energije, potrebne za razbitje jedra atoma. Tedanje dogajanje imamo lahko za začetek tistega, kar je pozneje postal zlati vek fizike visokih energij.

Za Rutherfordov znameniti poskus s sipanjem delcev α je bilo treba le nekaj vrvi in voska ter toliko več razuma in domišljije. Pozneje so pospeševalniki postali ena najzahtevnejših tehnologij na svetu.

Predzgodovina

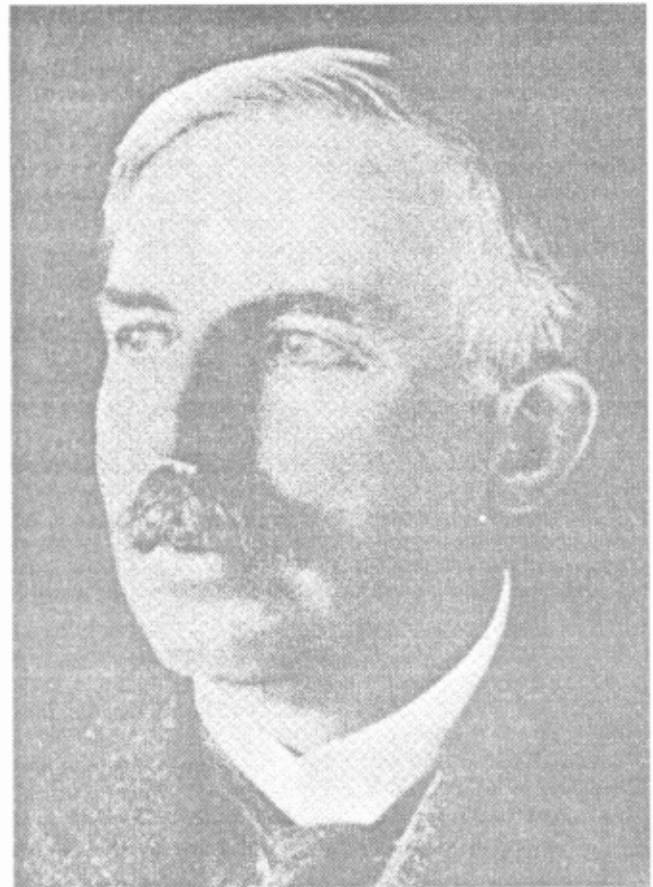
Umetnost izdelave pospeševalnikov se je rodila iz starejše tehnologije visokonapetostnih elektrostatskih naprav in vakuumskih črpalk. Prvega prednika teh naprav je sestavil okoli leta 1710 Anglež Francis Hawksbee (1670-1713), Hookov naslednik na mestu vodje eksperimentov pri Royal Society. Izpraznjeno okroglo stekleno posodo je vrtil okoli osi. Ko je vrtečo se posodo drgnil ob kos krzna, je dobil dovolj napetosti, da je lahko opazil praznjenje v posodi.

Leta 1784 je Nizozemec Martin van Marum (1750-1837) proizvajal več kot pol metra dolge iskre s čudovitim elektrostatskim strojem, ki je bil postavljen v veliki dvorani v Teylerjevem muzeju v Haarlemu na Nizozemskem.

Leta 1897 je J.J. Thomson pripisal katodnim žarkom lastnosti elektronov. Prvi je spoznal, da v svojih poskusih razbija atome.

Leta 1911 je Ernest Rutherford (1871-1937) objavil rezultate sipanja delcev α na atomih, ki so dokazovali obstoj trdnega jedra. Osem let pozneje se je Rutherfordu posrečila prva umetna sprememba jedra. Dušik je obstreljeval s 5 do 8 MeV delci α , ki so nastali pri razpadih radija in torija in dobil protone (Livingston, 1962, 4). Ob protonih so leta 1925 v Wilsonovi celici opazili še kratko sled kisikovega izotopa ^{17}O .

Po prvi svetovni vojni so raziskovalci rentgenskih žarkov razvili naprave, v katerih so delci dosegali energije 100



Slika 1. Ernest Rutherford (1871-1937), angleški fizik, ki je leta 1919 prvi razgradil atomsko jedro

do 200 keV. Zaradi težav pri izolaciji in zaradi razelektritev ni bilo mogoče doseči višjih energij, primerljivih z energijo žarkov radioaktivnih elementov, ki jih je uporabljal Rutherford. Preseganje teh težav je postala ena osnovnih usmeritev raziskovalcev. Kazalo je, da bo mogoče kmalu sistematično preučevati oziroma razbijati novoodkrita jedra atoma v pospeševalnikih z dovolj visokimi energijami.

Tekma za razbitje jedra

Ernest Orlando Lawrence (1901-1958) je bil vnuk norveškega učitelja, ki je emigriral v Madison, Wisconsin. Rojen je bil v majhni vasici Canton v Južni Dakoti 8.8.1901. Nobelovo nagrado iz fizike je dobil leta 1939.

Nekega pomladnega večera leta 1929 je Lawrence slučajno naletel na razpravo v reviji Archiv für Elektrotechnik manj znanega Norvežana Rolfa Wideröa, ki je delal pri Brown-Boveri Company v Švici. Pisanja si ni ogledal od začetka, dokler ni njegove pozornosti pritegnila skica merilne naprave.

Ideja Šveda Gustava Isinga iz leta 1924, ki jo je uporabil Wideröa leta 1928, je zadevala poznejši betatronski in

* 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 2. Ernest O. Lawrence (1901-1958) s svojim prvim ciklotronom

linearni resonančni pospeševalnik. Ni bila povsem nova. To metodo pospeševanja si je zamislil že Karl Taylor Compton (1887-1954), predsednik MIT, na primeru otroka na gugalnici. Vedel je, da s porivanjem v enakih časovnih presledkih lahko gugalnica zaniha do zelo velikih višin, če ravno jo je vsako porivanje premaknilo le za majhno razdaljo.

V Isingovem namišljenem aparatu naj bi hitrost linearno naraščala z energijo, kar ni bilo primerno za elektrone določene energije. Wideröu se je posrečil poskus z resonančnim pospeševanjem natrijevih in kalijevih ionov. Med tri valjaste elektrode je postavil presledka, dolga po 15 cm. Oscilator je naravnal na frekvenco malo nad 1 MHz s potencialnimi razlikami 20-50 kV. V takšnem linearnem pospeševalniku je pospešil ione do energij, ki so ustrezale dvakratni vrednosti izbrane napetosti. Tako je potrdil možnost, da lahko z majhno napetostjo damo izstrelkom zaznavno hitrost, če jo le dodajamo v pravilnih presledkih.

Lawrence je že dolgo iskal pot, po kateri bi se ognil visokofrekvenčnim tokovom v svoji zapleteni napravi, v kateri je pospeševal izstrelke do ogromnih hitrosti v izpraznjeni posodi. Tako je Wideröeva ideja pri njem padla na plodna tla. V nekaj minutah je narisal aparat in zapisal enačbe. Naslednji dan je prijatelju že poročal o izumu.

Zamisel Lawrence je bila, da naj bi električno nabiti izstrelki krožili v močnem magnetnem polju. Izstrelki so najprej dobili močan pospeševalni sunek v recipientu v praznem prostoru v obliki ponve, opremljene s pokrovom. Lawrence je nato izstrelke pospeševal s ponavljajočimi se električnimi sunki, zaradi katerih je izstrelki krožili po vedno širših krogih z vedno višjimi hitrostmi. Končno je izstrelki zadeli rob recipienta in na prehodu skozi razpoko prileteli v merilni prostor. Tam so z izstrelki obstreljevali jedra atomov.

Lawrence je nastavljal gostoto magnetnega polja tako, da je izstrelki prileteli ravno v trenutku, ko je izmenični tok spremenil svojo smer in je bil pripravljen za sprejem naslednjega sunka. Nihanja visoke frekvence je uporabljal za povečevanje hitrosti izstrelka. Lawrence je upal, da bo s tisočkrat uporabljenimi tisoč volti dobil enak učinek, kot če bi enkrat uporabil milijon voltov.

Januarja 1930 je konstruiral prvi pospeševalnik na resonanco, kasneje imenovan ciklotron. Med pola elektromagneta je postavil izčrpano posodo premera 10 cm. Znotraj posode je postavil dve izolirani elektrodi v obliki črke D, povezani z izmenično napetostjo visoke frekvence. Drugi deli naprave so bili iz stekla, ki ga je hermetično zatesnil z voskom.

Ob pomoči diplomanta N.E. Edlfsena je dobil resonanco. Septembra 1930 je Lawrence na seji nacionalne akademije znanosti v Berkeleyju prvič javno poročal o svoji napravi na krožno magnetno resonanco in objavil razpravo v reviji Science skupaj z Edlfsenom (Jaffe, 1944, 441; Wilson, 1981, 88; Livingston, 1962, 134).

Lawrencov ciklotron je bil sprva namenjen raziskovanju strukture atomov. Po prvem modelu iz stekla je Lawrence s pomočjo svojega učenca Livingstona sestavil drugo, podobno napravo iz kovine. S napetostjo 2000 V je lahko pospešil vodikove ione do energij 80 keV. Livingston je v doktoratu z dne 14.4.1931 demonstriral veljavnost principa ciklotronske resonance (Livingston, 1962, 134).

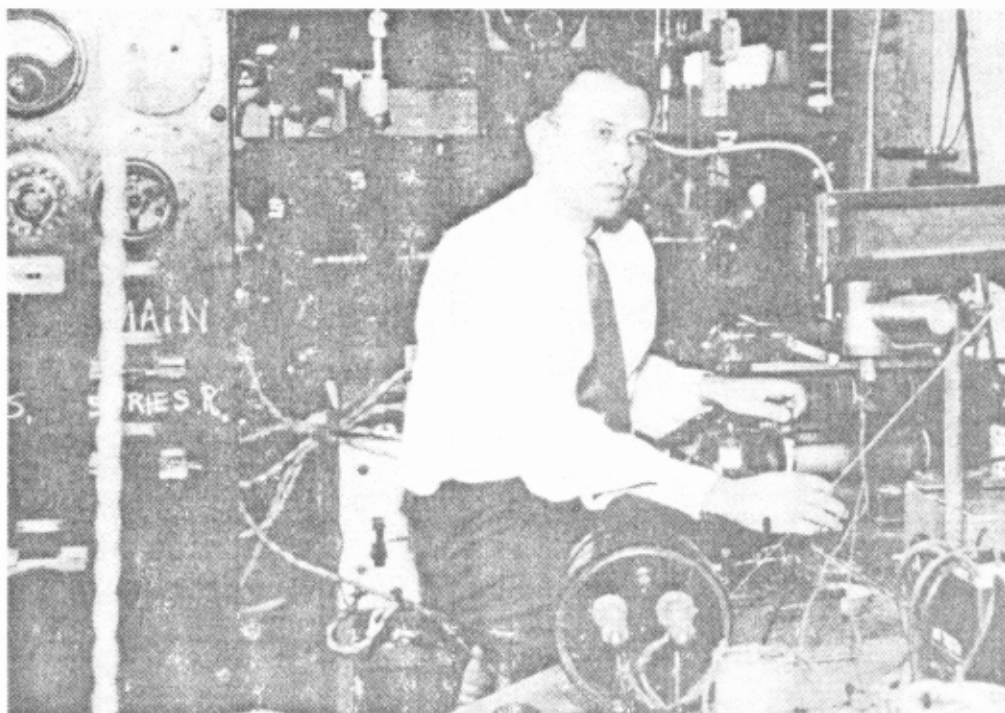
Februarja 1932 je Lawrence zgradil model, vreden 1000 USD, velikosti 30,5 cm in s pospeševalno napetostjo 1.2 MV. Poleti 1932 je Lawrence s svojo napravo prvi v Novem svetu razbil litijevo jedro.

Angleži dobijo tekmo

Lawrence in Livingston sta bila prva, ki sta pospešila protone nad 1 MeV. Kljub temu pa nista prva razbila jedra atoma. To se je posrečilo v Cavendishevem laboratoriju Angležu Cockcroftu in Ernestu Thomasu Sintonu Waltonu, rojenemu leta 1903 na Irskem.

Vodja laboratorija Rutherford je sprva nasprotoval dragim investicijam v pospeševalnike. Vlekla ga je romantika pretekle generacije, ko je bilo mogoče s primitivnim orodjem dobiti pomembna fizikalna odkritja. Leta 1927 pa je v govoru pred Royal Society že napovedoval naprave s 300 in 900 kV, ki bodo omogočale preučevanje strukture atomskega jedra. Konec leta 1928 je napolnil Cockcrofta k začetku del na visokonapetostnem pospeševalniku, kjer se mu je naslednje leto pridružil še Walton. Prvi poskusi so bili opravljeni marca 1930.

Marca 1932 sta Cockcroft in Walton preuredila napravo za obstreljevanje litijevih jeder s protoni. Pri 125 kV sta že opazila veliko močnih scintilacij, ki jih je bilo pri 400 kV že več sto v minuti pri toku protonov nekaj μA . Zaradi iskrenja sta Cockcroft in Walton lahko ohranjala napetost



Slika 3. Ernest C. Lawrence s svojim ciklotronom iz leta 1934, premer ciklotrona je bil 67,5 cm.

le do pol milijona voltov, po drugih virih tudi 600 in 700 kV. Rutherford je kljub temu spodbujal poskus. Verjel je teorijam Gamowa (1928) ter Condon in Gurneya (1929), po katerih naj bi že 0.5 MeV ali manj zadostovalo za razbitje lahkih jeder (Livingston, 1963, 4), čeprav so drugi raziskovalci predvidevali prodor v jedro šele pri napetostih okoli 1 MV.

Po trku protonov z litijevimi jetri v Cavendishevem laboratoriju so nastajali delci z največjim dosegom okoli 8 cm. To je dokazovalo, da gre za delce α , kar so potrdili še posnetki v Wilsonovi celici. Jedro atoma je bilo prvič moč razbijati kontrolirano, alkimije je postala realnost.

20.4.1932 je Rutherford poročal o uspehih Cockcrofta in Waltona pred Royal Society. Angleži so dobili tekmo in pokazali, da gre vendarle za fiziko in ne zgolj za moč uporabljenega orodja. Ugotovili so tudi masni defekt 0.018574 a.m.e., ki je ustrezal napovedim Einsteinove enačbe. Podobne poskuse so opravili tudi z borom, fluorom in aluminijem. Scintilacije so dobili tudi pri poskusih z berilijem in ogljikom, ne pa s kisikom in bakrom pri obstreljevanju s protoni energije do 4 keV (Staroseljskaja, 1967, 258-261). Podobne transmutacije atomov je leta 1935 preučeval tudi Lawrence.

Kmalu je Cockcroft-Waltonov pomnoževalnik napetosti lahko dosegal 750 kV. Pozneje so na osnovi njihovih načrtov pri družbi Philips v Eindhoven postavili za Cavendishev laboratorij napravo, ki je dosegala 1,25 MV. Izkazalo se je, da je to praktična meja, ki jo lahko doseže pospeševalnik tega tipa v zraku pri atmosferskem tlaku (Livingston, 1962, 5).

Rutherford je dobil Nobelovo nagrado iz kemije leta 1908, leta 1951 pa sta si Cockcroft in Walton delila Nobelovo nagrado iz fizike za uspehe pri razvoju pospeševalnikov.

Pospeševalniki prerastejo v "big science"

William Brobeck je bil prvi profesionalni inženir, ki je leta 1938 nastopil službo pri Radiation Laboratory. Prav on si je najbolj prizadeval za spremembo prejšnje tehnologije "niti in voska" v sodobno inženirsko prakso (Wilson, 1981, 97).

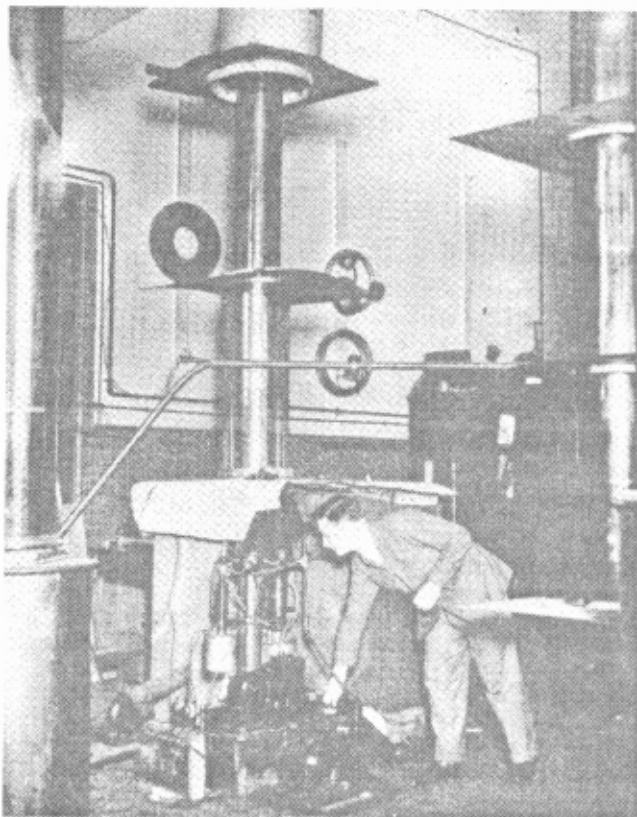
V tridesetih letih je Lawrence sestavil ciklotron velikosti 70 cm, ki je dajal nekaj mikroamperov toka devteronov z energijo 5 MeV ali helijevih jeder z energijo 10 MeV. Pol velikega elektromagneta je imel premer 114 cm in je bil zakopan v zemljo do višine kuhinjske peči. Komandni prostor je bil 5 m višje, operaterja pa je varovala pred sevanjem še dodatna zaščitna ovojnica.

Leta 1939 je Lawrence postavil svoj ciklotron velikosti 70 cm v večji ciklotron velikosti 1.5 m, ki je bil postavljen za medicinska preučevanja raka. Večji ciklotron je bil težak 220 ton in je dajal tok devteronov 10 mA s 16 MeV ali pa tok 1 mA helijevih ionov z energijami po 32 MeV.

Julija 1941 je Lawrence začel v Berkeleyu zidati zgradbo s 24 stranicami. Visoka je bila 30 m, s 50 m premera, vanjo pa naj bi postavili ciklotron do tedaj še ne dosežene moči. Dela so se nadaljevala tudi po napadu na Pearl Harbour 7. decembra, saj je bilo mogoče pričakovati tudi dejavnosti za vojaške potrebe (Jaffe, 1944, 456-457). Ta 467 cm velik sinhrociklotron je bil končan po vojni leta 1949. Stal je 1,8 milijonov USD in je dosegal 340 MeV, po drugih virih 380 MeV. Leta 1887 rojeni Američan Alfred Lee Loomis, bankir multimilijonar in znanstvenik, je bil posebno zaslužen za zbiranje potrebnega denarja (Alvarez, 1983, 31).

Da bi presegli prag ~100 MeV, ki nastane zaradi naraščanja mase pospeševanih delcev, so uporabili idejo Američana McMillana in Rusa Vladimirja Vekslerja (1907-

1966) iz let 1944 in 1945 o sinhronizaciji magnetnega in električnega polja. Tako so dosegli stalno pospeševanje ionov v sinhrociklotronu (Lapp, 1960, 183; McMillan, 1984, 31).



Slika 4. Cockcroft-Waltonov generator napetosti (do 750 kV) v Cavendishovem laboratoriju.

McMillan je leta 1951 dobil Nobelovo nagrado iz kemije za odkritje transuranskih elementov.

Van de Graaffov pospeševalnik

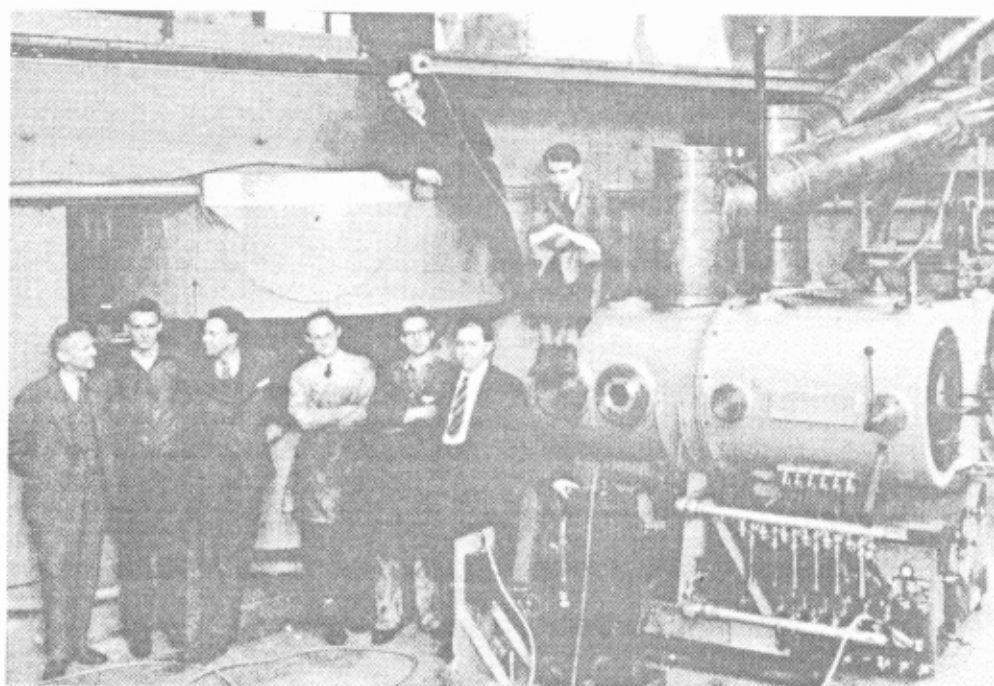
Že leta 1748 je Benjamin Franklin (1706-1790) delal poskuse s strelo. Poskus, da bi energijo strele ujel v kondenzator, je leta 1753 v Petrogradu spravljal ob življenju Georga Wilhelma Richmana (1711-1753).

Tudi med tekmo za razbijanje atomov v tridesetih letih so raziskovalci vedeli, da so napetosti pri streli 15 MV, kar je bilo precej več, kot so v laboratorijih lahko takrat uporabljali za pospeševanje delcev. Zato so Brush, Lange in Urban delali poskuse na gori Generoso v Švici. Med dvema skalama so napeli kovinsko mrežo, na kateri se je nabiral pozitiven naboj. Pri posebno močni streli so lahko dobili iskro dolgo 5 m, ki je ustrezala napetosti 10 MV. Vendar se je Urban med poskusom smrtno ponesrečil (Karcev, 1969, 53).

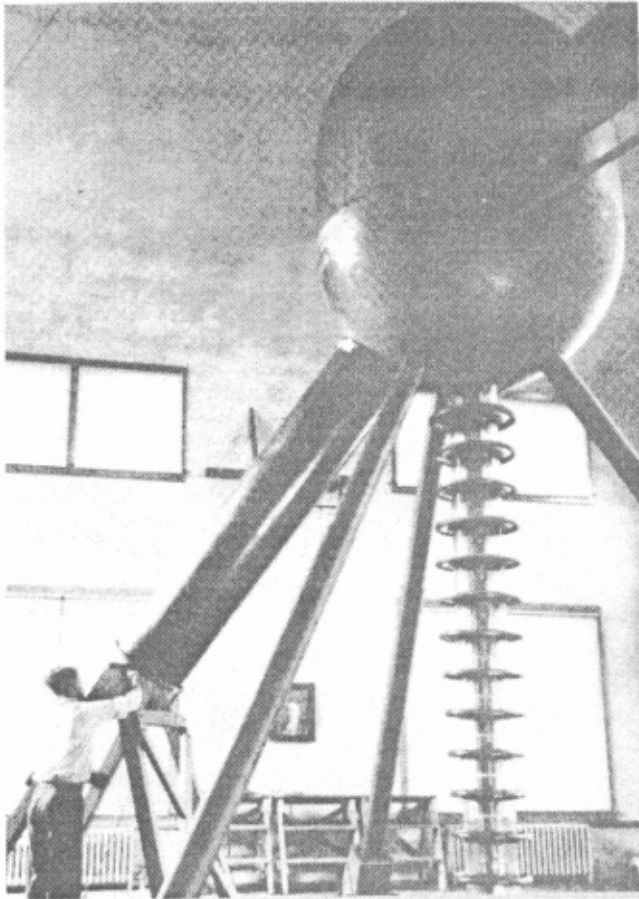
Med leti 1919-1932 so pospeševalnike gradili s pomočjo generatorjev visoke napetosti, ki so neposredno pospeševali nabite delce v konstantnem električnem polju. Razvoj takšnih naprav je bil okronan z elektrostatskim Van de Graaffovim generatorjem leta 1931 in kaskadnim generatorjem Cockcrofta in Waltona leto pozneje.

Robert Jemison Van de Graaff (1901-1967) iz Alabame je uporabil transformator za povečevanje napetosti in s tem sledil starim idejam Olta von Guericka iz leta 1671. Idejo o nabijanju elektrostatskega generatorja s tekočim trakom je prvi predlagal Augusto Righi (1850-1920) okoli leta 1890. Priredil je starejšo Kelvinovo zamisel o generatorju na nabite kapljice vode.

Carl T. Compton s fizikalnega oddelka univerze v Princetonu je podprl idejo svojega sodelavca Van de Graaffa. Tako je leta 1929 nastal prvi model. Leta 1931 je dosegel napetost 1.5 MV, o čemer je poročal pred Ameriško fizikalno družbo (Livingston, 1963, 31-32).



Slika 5. Ciklotron s premerom 1.5 m, ki so ga leta 1939 postavili Lawrence in sodelavci. Z leve proti desni stojijo: Donald Cooksey, Dale Corson, Ernest O. Lawrence, Robert Thornton, John Backus in Winifield W. Salisbury; sedita Louis W. Alvarez (levo) in Edwin M. McMillan (desno).



Slika 6. Prvi Van der Graaffov elektrostatični pospeševalnik, ki so ga leta 1930 zgradili Merle A. Tuve, Odd Dahl in Lawrence Fafstad v Carnegie Institution v Washingtonu.

Leta 1932 je Van de Graaff prešel na MIT, kjer je ob Comptonovi podpori začel delati na močnejših generatorjih. Istočasno so Merle A. Tuve, Odd Dahl in Lawrence Hafstad v Carnegie Institution v Washingtonu zgradili prvi praktični Van de Graaffov elektrostatični pospeševalnik (Livingston, 1963, 33). To je bila ena prvih naprav, ki je omogočala pospeševanje do energije okrog 1 MeV, potrebne za prodor v jedro atoma.

Leta 1933 je Van de Graaff sestavil napravo "Grosse Bertha" iz dveh delov, ki sta tehtala po 16 ton. Skrbno polirana krogla iz aluminija premera 5 metrov in debeline 6 mm je bila postavljena na vrh izoliranega valja, ki je imel premer 7.5 m in višino 2 m. V votli valj je bil speljan premikajoči se jermen iz svile ter nanj prenašal naboj iz visokonapetostnega usmernika. Pozneje je Westinghouseova električna družba na enakih principih postavila velikansko hruškasto napravo za razbijanje atomov v predmestju Pittsburga (Jaffe, 1944, 445-446).

Van de Graaffov pospeševalnik pri nas

27.11.1954 je v laboratoriju Edvarda Cilenška "za gradnjo in vzdrževanje akceleratorjev (E3)" delal že električni del Van de Graaffovega pospeševalnika lastne izdelave pri tlaku 1 atmosfere. Domači znanstveniki so za napravo sami napravili načrte, sami konstruirali, sestavljali in preizkušali posamezne dele.



Slika 7. Donald W. Kerst s svojim prvim betatronom (2.3 MeV), ki ga je zgradil leta 1940 na Univerzi v Illinoisu.

Celotna gradnja pospeševalnika je trajala nekaj več kot štiri leta, med leti 1953 in 1957. Zgradili so napravo zaprtega tipa, ki je obratovala pod tlakom 10 atmosfer dušika. Lahko so fokusirali elementarne delce na tarčo v območju med 200 kV in 2,3 MV. Za visoki vakuum v pospeševalni cevi so uporabili difuzijsko črpalko s sesalno hitrostjo 500 l/s (Cilenšek, 1958, 188, 394 in 396).

Maja 1956 so prvič pospešili žarek skozi cev pri napetosti 2 MV. Marca 1961 je bil pospeševalnik dokončan in od takrat v skoraj stalnem obratovanju.

Leta 1963 so z Van de Graaffovim pospeševalnikom preučevali strukturo nivojev v lažjih elementih s pomočjo reakcije (p,γ) . Vendar je bila naprava za raziskave v jedrski fiziki že zastarela, podobno kot betatron in nevtronski generator (Kroflič, 1989, 19, 20, 22, 23, 26, 28, 30 in 31).

Pospeševalniki elektronov

Prvi pospeševalnik elektronov je bila "katodna cev", ki so jo uporabljali že pred poldrugim stoletjem. V 20. stoletju so elektrone najprej pospeševali z napravami Van de Graaffa, s katerimi pa ni bilo mogoče preseči nekaj MeV. Ciklotron ni bil uporaben, saj začne masa pospeševanih elektronov zaznavno naraščati že pri nekaj 10 keV.

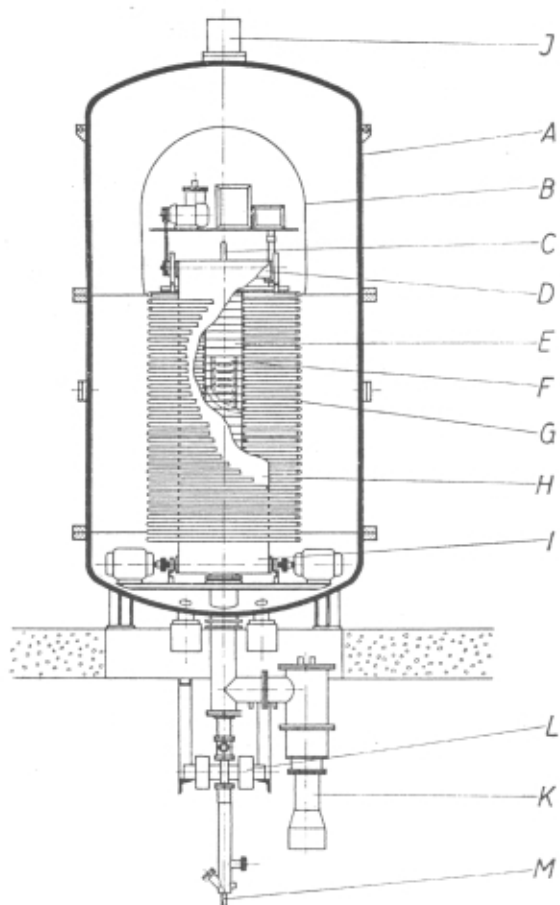
Ameriški inženir Slepian in Wideröe zato v tridesetih letih nista dosegla večjih uspehov pri pospeševanju elektronov. Leta 1933 je M. Steenbeck pri Siemens Röhrenwerk matematično formuliral pogoje za stabilnost polja v pospeševalniku (Siemens, 1957, II, 195).

Američan Kerst z univerze Illinois je leta 1940 konstruiral betatron, ki je uporabljal zakon elektromagnetne indukcije in dosegal 2,3 MeV. Uporabil je Wideröevo idejo "pretvornika curka" iz leta 1928, ki je zadevala magnetni indukcijski del betatrona. Vendar Wideröe še ni poznal zakonitosti, s katerimi lahko obdržimo elektrone v orbiti (Abramov, 1977, 101; Laughlin, 1983, 29; Livingston, 1962, 134; Kerst, 1941, 48).

Betatron pri nas

Poleti leta 1954 so na Institutu Jožef Stefan kupili betatron. Leta 1956 se je Darku Jamniku posrečilo pri energiji 20 MeV doseči stabilizacijo na 5 keV. Tako je bil betatron

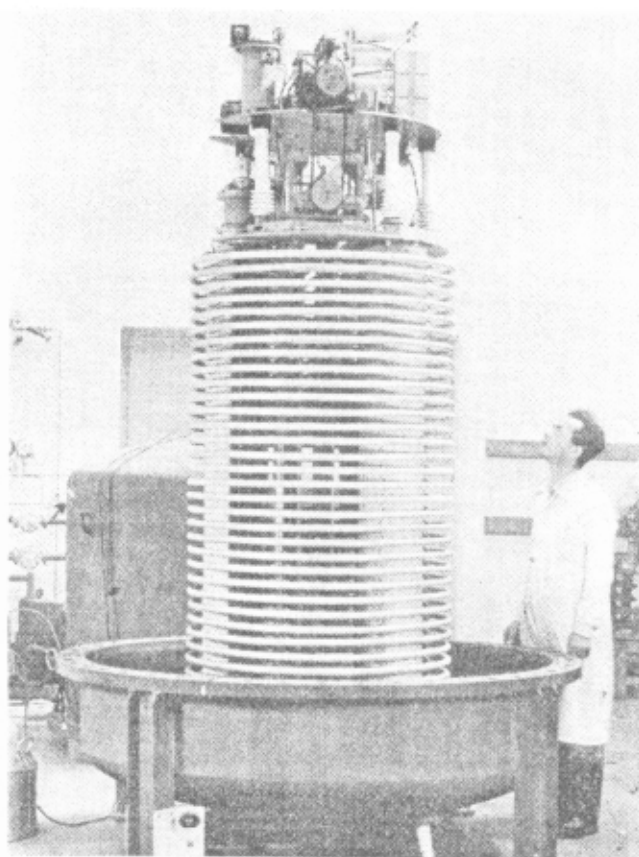
na IJS v območju energij do 30 MeV najnatančnejša naprava na svetu za raziskovanje jedrskega fotoefekta (Kroflič, 1989, 19, 20, 22 in 23).



Slika 8. Prerez elektrostaticnega pospeševalnika za 2 MV na Inštitutu Jožef Stefan v Ljubljani (A - kotel, B - visokonapetostna elektroda, C - ionski izvir, D - gornji valj, E - pospeševalna cev, F - elektrode, G - koronski obroči, H - trak, I - spodnji valj, J - rotacijski voltmeter, K - difuzijska črpalka, L - masni separator in M - tarča)

LITERATURA

- Alvarez Luis Walter (rojen 1911), Alfred Lee Loomis - last great amateur of science, *Physics today*, januar 1983, 25-34
- Cilenšek Edvard, Elektrostaticni pospeševalnik na Inštitutu "Jožef Stefan" v Ljubljani, *Elektrotehnični vestnik*, (1958) 187- 192 (I del) in 393-397 (II del)
- Cockcroft John Douglas (1897-1967), Scattering the atom, v zborniku: *Science lifts the veil*, Longmans Green & Co. Ltd, Cambridge, 1944



Slika 9. Elektrostaticni pospeševalnik za 2 MV z odkritim kotlom in odkrito visokonapetostno elektrodo, zgrajen na Inštitutu Jožef Stefan.

- Jaffe Bernard, *Savant Americans*, Overseas editions, INC., New York, 1944
- Karcev V., *Novelli o fizike*, Znanie, Moskva, 1969
- Kerst Donald William (rojen 1911), The Acceleration of Electrons by Magnetic Induction, *Phys.Rev.* 60 (1941) 47-53
- Kroflič Marjan, 40 let Inštituta "Jožef Stefan", Ljubljana, maj 1989
- Lapp Ralph E., *Roads to discovery*, Harper & Brothers Publishers, New York 1960
- Laughlin John S., History of medical physics, *Physics today*, julij 1983, 26-33
- Livingston Milton Stanley (rojen 1905) in John P. Blewett, *Particle accelerators*, McGraw-Hill, 1962
- McMillan Edwin Mattison (rojen 1907), A history of the synchrotron, *Physics today*, februar 1984, 31-37
- Siemens Georg, *History of the house of Siemens*, II, Karl Alber, Freiburg/Munich, 1957
- Starosejskaja-Nikitina O.A., Ernest Rutherford, *Nauka*, Moskva, 1967
- Wilson R.R., US particle accelerators at age 50, *Physics today*, november 1981, 86-103

NASVETI

KRIOČRPALKE, HLAJENE S HELIJEVIMI KRIOGENERATORJI

1 NAČIN DELOVANJA

O kriogenskih črpalkah ali kriočrpalkah smo v VAKUUMISTU že pisali (A. Banovec: Črpanje s kriočrpalkami, Vakuumist 17, 1989, str. 3,4). Ker pa je od tedaj do danes preteklo že precej časa, bomo na začetku na kratko opisali način delovanja.

Te črpalke delajo tako, da plin zmrznejo (kondenzirajo) na svojih notranjih površinah, ki morajo biti zato dovolj hladne. Temperature 10 do 20 K so že tako nizke, da vsi plini razen neona, vodika in helija, zmrznejo in je njihov parni tlak nižji od 10^{-10} mbar. Navedene tri pline, ki se ne kondenzirajo pri teh temperaturah, pa lahko črpamo, ali bolje rečeno, adsorbiramo na površini aktivnega oglja, ki je nanoseno na notranjo stran najhladnejše (npr. 15 K) plošče ali kondenzorja (drugi izrazi zanje so še: kriopanel, krioplošča, hladilno rebro, hladilno krilo...). Na tak način ustvarimo vakuum, v nasprotju s kinetičnimi črpalkami, ki odstranjujejo plin tako, da potiskajo "molekulo za molekulo" iz vakuumske posode (komore) proti svoji izstopni (izpušni) strani, dokler jih končno ne zrinejo na atmosfero.

Da bi lahko dosegli tako nizke temperature, uporabljamo pri kriočrpalkah, o katerih bomo v tem prispevku govorili, zaprt helijev krožni plinski sistem za hlajenje črpalke notranjosti, tj. njenih posebej oblikovanih plošč. Naključno gibanje molekul plinov prinese le-te v dotik s temi površinami, kjer se kondenzirajo ali adsorbirajo. Kriočrpalke prigraden kompresor potiska helij (pri sobni temperaturi, tlak 22 bar) skozi pregibno cev do hladilnih glav črpalke*, ki sta termično povezani z (navadno) dvema skupinama kondenzacijskih reber (kriopanelov). V hladilnih glavah helij ekspandira (z 22 na 5 bar) in ju zato ohladi. Plin teče nato nazaj v kompresor skozi drugo pregibno cev in tako sklene cirkulacijski krog. Zunanja rebra, ki so grajena kot lovilnik povratnih oljnih par pri difuzijskih črpalkah (sl.1) in so povezana s hladilnim ščitom, so hlajena na (nominalno) temperaturo 80 K, kjer se kondenzirata vodna para in CO₂, kar predstavlja največjo masno obremenitev črpalke. Notranja rebra so hlajena na 10 do 20 K (nominalno na 15 K), kjer se kondenzira večina preostalih plinov. Tako se vsi plini in pare, ki se lahko kondenzirajo, spremenijo v trdno snov. Plini, ki se ne kondenzirajo, pa se postopoma adsorbirajo na površinah, ki so prevlečene z ogljenimi zrnci.

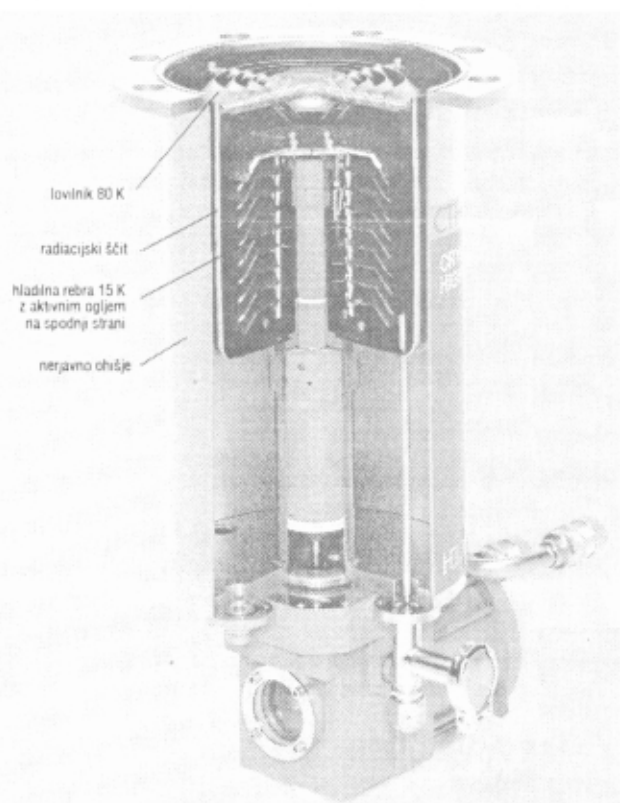
Materiali, iz katerih je narejena kriočrpalke: ohišje in prirobnice so iz nerjavnega jekla, radiacijski ščit in lovilnik (prva stopnja 80 K) sta iz bakra (svetlo nikljanega) ali iz aluminija, visokopolirana, ščit počrnjen na notranji strani. Vse, kar je izdelano iz bakra, je tudi svetlo nikljano. Krioplošče (kriopaneli) druge stopnje so iz toplotno zelo prevodnega bakra, svetlo nikljanega. Adsorbent na

spodnji strani teh kriopanelov je aktivno oglje.

Vsaka kriočrpalke ima tovarniško vgrajen in zatesnjen varnostni ventil, naravnani na 50 mbar nadtlaka (nad atmosferskim tlakom). Temperaturo kriopanelov (2. stopnja) merimo s termometrom (plinski kontaktni termometer, napolnjen z vodikom od 1 do 5 bar in umerjen; skala navadno od 14 do 27 K).

2 ČRPALNA HITROST IN KONČNI TLAK

V bistvu je kriočrpalke trojna, neodvisna kondenzacijska črpalke, kjer vsaka od teh odstranjuje specifične pline oz. pare z različnimi hitrostmi. Črpalna hitrost pa je odvisna predvsem od oblike hladilnih površin (hladilnih reber, kriopanelov ali krioplošč). Čelna rebra (pri vstopni odprtini črpalke), ki imajo obliko lovilnika, so najbolj zgoščena in morajo kondenzirati oz. zmrzniti vodno paro in CO₂. Morajo pa tudi zagotoviti veliko prevodnost, da lahko preostali plini zlahka prodrejo do notranjih, bolj hladnih reber, kjer se kondenzirajo, neon, helij in vodik pa se adsorbirajo na ogljeni plasti. Črpalne hitrosti za posamezne pline so med seboj zelo različne. V splošnem je črpalna hitrost za zrak dvakrat večja kot za vodik. Vse pa so odvisne od nasičenosti (zasedenosti) kriopovršin s kondenziranimi plini. V začetku oz. po regeneraciji so načeloma največje.



Slika 1. Notranjost kriočrpalke Cryo-Torr 8, proizvajalca CTI-CRYOGENIS

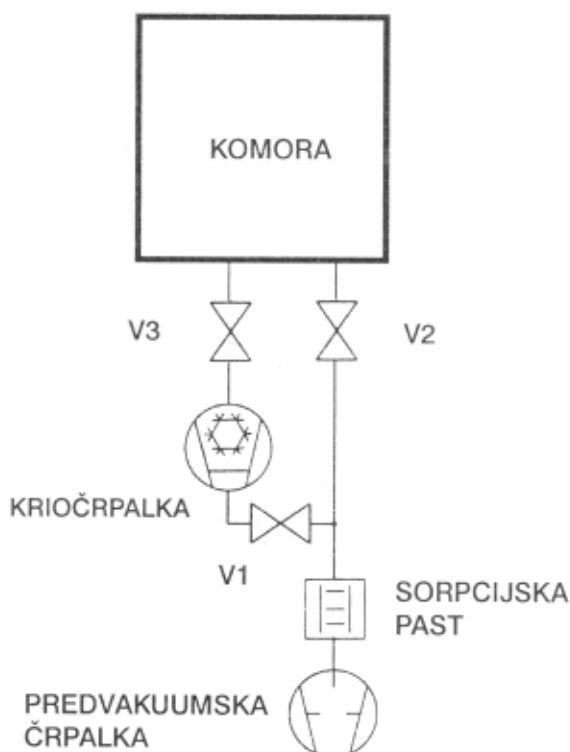
* Vodno hlajeni kompresor in hladilni glavi, ki sta s kompresorjem povezani z gibkima cevema, imenujemo kriogenerator. Sistem je napolnjen s superčistim helijem; tlak 16 bar med mirovanjem.

Ker kriočrpalke "držijo" kondenzirajoče pline pri tlakih pod 10^{-10} mbar, je končni tlak odvisen le od črpalne hitrosti in plinske obremenitve (tj. količine plina, izražene v mbar.l). Pri elastomernih ("gumijastih") tesnilih dosežejo kriočrpalke same (brez priključenega visokovakuumskega ventila in komore) končni tlak pod 10^{-8} mbar, s kovinskimi tesnili pa pod 10^{-9} mbar.

3 ČRPANJE VISOKOVAKUUMSKEGA SISTEMA S KRIOČRPALKO

Shema visokovakuumskega sistema s kriočrpalko je prikazana na sl. 2. Črpanje s kriočrpalko začnemo lahko šele, ko smo predhodno izčrpali črpalko do npr. 10^{-1} mbar (ventil V1 odprt) in nato posebej komoro (ventil V1 zaprt, V2 odprt) do neke točke, ki je izražena s količino plina v mbar.l (milibarlitri), ki je po predčrpanju z rotacijsko črpalko še ostal v komori in ga bo kriočrpalka še sposobna prevzeti (izčrpati). (Opomba: Pri difuzijskih črpalkah je začetek črpanja označen z mejnim oz. kritičnim predtlakom v mbar.) Poznati moramo torej prostornino visokovakuumske komore, ki jo evakuiramo. Za vsako kriočrpalko navedejo proizvajalci podatek, ki ga imenujejo "crossover", ki je po PNEUROF-u definiran kot "maksimalna količina dušika (mbar.l), ki ga lahko izčrpa kriočrpalka v kratkem časovnem intervalu, pri čemer temperatura kriopanelov ne preseže 20 K". Ta definicija pa ni zadostna. Predložena je že bila bolj celovita in praktična definicija tega pojma (1). "Crossover" je torej merilo za količino plina, ki vdre v črpalko, ko odpremo glavni, visokovakuumski ventil (V3). Mi bomo imenovali "crossover" največjo dovoljeno količino plina (mbar)

Za zgled vzemimo kriočrpalko CRYO-TORR 8 (proizvajalec CTI-CRYOGENICS), sl.1, z največjo dovoljeno količino plina p_0V 200 mbar.l. Če uporabimo komoro s



Slika 2. Shematski prikaz visokovakuumskega črpalnega sistema s kriočrpalko

prostornino 100 l, je največji dovoljeni tlak $p_c=200$ mbar.l/100 l = 2 mbar. Če bi imela komora prostornino 200 l, pa bi bil p_c le 1 mbar. Ta zgled nam pokaže, da imajo kriočrpalke značilno višje tlake (v primerjavi z difuzijskimi črpalkami, kjer so okoli $2 \cdot 10^{-1}$ mbar), pri katerih že lahko obremenimo kriočrpalko (tj. odpremo visokovakuumski ventil V3). To pa zelo skrajša črpalne čase. Najvažnejše pri tem je, da je grobovakuumski vod (od rotacijske predčrpalke do VV-komore in do kriočrpalke) med črpanjem v tki. viskozem področju pretokov, kar učinkovito preprečuje povratni tok oljnih par (iz rotacijske predčrpalke v komoro), ki je glavni vzrok za onesnaženje pri večini vakuumskih sistemov. Prednost teh kriočrpalk je tudi, da so odporne proti hitrim vdorom atmosferskega zraka ter ne povzročajo vibracij. Montirane so lahko v kateri koli legi.

4 HLADILNA KAPACITETA KRIOGENERATORJA

Kot smo že uvodoma povedali, imajo kriočrpalke navadno dve hladilni stopnji: prvo s temperaturo okoli 80 K, drugo okoli 15 K. Da bi lahko ohladili prvo stopnjo - ki je v mehanskem in termičnem kontaktu s sevalnim ščitom in lovilnikom kriočrpalke - na temperaturo 80 K (za zmrzovanje vode in CO₂), potrebujemo hladilno kapaciteto med 12 in 80 W. Za drugo stopnjo (od 12 do 20 K), ki jo predstavljajo kriopaneli (krioplošče, hladilna rebra, hladna krila...), pa potrebujemo hladilno moč 2 do 5 W. Te kapacitete pa ne zadoščajo, kadar črpalka ne dela v molekularnem področju pretokov, kjer je toplotno prevajanje plinov (konvekcija) zanemarljivo. Če tlak v kriočrpalki naraste nad 10^{-2} mbar, naraste tudi toplotna prevodnost plina in normalna kapaciteta hladilnika ne zadošča za uspešen začetek delovanja kriočrpalke (temperatura hladilnih površin naraste, črpalna hitrost pade, tlak v komori se le neznatno zmanjša). Za obravnavano vrsto kriočrpalk velja empirična formula, in sicer: $p_c \cdot V / Q_2 = 30$ mbar.l/W, pri čemer je p_c začetni največji dopustni tlak (tlak v komori, ki smo ga dosegli s predčrpalko), V je prostornina komore, Q_2 je hladilna kapaciteta druge stopnje pri 20 K.

Zgled: Hladilna kapaciteta (moč) druge stopnje je npr. $Q_2 = 2$ W. Iz gornje enačbe sledi, da je $p_c \cdot V = 60$ mbar.l. Če ima komora prostornino $V = 100$ l je največji dovoljeni tlak $p_c = 60/100 = 0,6$ mbar. Če pa bi bila moč $Q_2 = 5$ W, bi lahko odprli visokovakuumski ventil V3 že pri tlaku $p_c = 150$ mbar l/100 l = 1,5 mbar.

5 REGENERACIJA KRIOČRPALK

Ker so kriočrpalke kondenzacijske in ne transportne, jih je treba občasno regenerirati ali "odtaliti", ker se med delovanjem nasitijo s kondenziranimi (zmrznjenimi) plini in parami in začne njihova črpalna kapaciteta močno padati. To spoznamo po tem, da začne temperatura, npr. 15 K (merjena v 2. stopnji s plinskim termometrom), med delovanjem črpalke počasi naraščati. Desorpcija vodika se namreč začne že pri 18 K, dušika pa pri okoli 25 K. Naraščanje temperature pomeni, da je nastopil čas, ko moramo črpalko regenerirati, kar storimo takrat, ko je najmanj moten proizvodni (ali tudi raziskovalni) oz. delovni program, npr. ponoči, ob koncu tedna, leta...

Ko izključimo hladilnik oz. kriogenerator, se začne črpalka samodejno ogrevati. Ker se med tem sproščajo kondenzirani in adsorbirani plini in pare, jih moramo sprosti odčrpavati (odpremo ventil V1, zapremo V2 in V3 -

slika 2) s predčrpalko. Če tega ne bomo storili, bo to "uredil" varnostni ventil, kar pa ni priporočljivo. Čas ogrevanja črpalke do sobne temperature je skoraj enak času ohlajanja do 20 K in je za manjše črpalke (premer ustja 150 mm) okoli 60 minut, za večje (premer ustja 500 mm) pa 200 minut. Nekatere črpalke imajo tudi možnost vgraditve električnega grelnika za pospešeno regeneracijo.

Dobro je tudi vedeti, da je treba po 16.000 do 26.000 urah delovanja črpalke zamenjati adsorber v kompresorju, po 8.000 urah pa tesnila v hladilnih glavah. Občasno je treba po navodilih proizvajalca "dopolnjevati" kriogenerator s helijem, ki počasi, kljub dobri tesnitvi, uhaja iz sistema, kar lahko ugotovimo s pogledom na priključeni manometer.

6 NASVET ZA POTENCIALNE UPORABNIKE

Pred dobrim desetletjem so bile različne vrste kriočrpalk zelo v modi. Tudi danes se še uporabljajo, vendar so jim pri dinamičnih vakuumskih sistemih turbomolekularne črpalke največje tekmice. Kriočrpalke same po sebi niso zahtevne, pač pa največ težav v praksi povzročajo kriogeneratorji oz. njihovi helijevi kompresorski hladilniki, pa tudi helij rad uhaja iz hermetično zaprtega sistema in s tem onemogoča dobro delovanje črpalke. Stroški servisiranja so kar precejšnji, kajti z lastnimi servisnimi "silami" si ne boste mogli dosti pomagati, kadar bo kaj odpovedalo.

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

IZOBRAŽEVANJE

IZOBRAŽEVALNI TEČAJI v jeseni 1995

Vse uporabnike vakuumске tehnike obveščamo, da sta za jesen 1995 predvidena naslednja strokovno izobraževalna tečaja:

VZDRŽEVANJE VAKUUMSKIH NAPRAV

28.-29. november 1995

Obravnavana bo predvsem tematika, ki jo srečujemo v tehniki grobega vakuuma. To je: delovanje, vzdrževanje in popravila rotacijskih črpalk, pregled in uporaba različnih črpalk, ventilov in drugih elementov, meritve vakuuma, hermetičnost in odkrivanje netesnosti v vakuumskih sistemih, materiali za popravila, tehnike čiščenja in spajanja, skupno 16 ur, od tega tretjina praktičnih prikazov in vaj.

Cena tečaja je 30.000 SIT. Vsak tečajnik bo prejel tudi brošuro "Vzdrževanje vakuumskih naprav" in potrdilo o opravljenem tečaju.

OSNOVE VAKUUMSKE TEHNIKE

9.-12. oktober 1995

Pri tem tečaju je večji poudarek na teoretičnem razumevanju snovi. Obravnavana so vsa že prej omenjena področja in poleg tega še: pomen in razvoj vakuumске tehnike, fizikalne osnove, črpalke za visoki vakuum, tankoplastne in druge vakuumске tehnologije, čisti postopki,

analize površin ter doziranje, čiščenje in preiskave plinov - skupno 20 ur z vajami in ogledom inštituta.

Cena tečaja je 26.000 SIT. Udeleženci prejmejo zbornik predavanj "Osnove vakuumске tehnike" in potrdilo o opravljenem tečaju.

Tečaja "Osnove vakuumске tehnike za srednješolske predavatelje" bosta tudi dva:

21-23 septembra in 9.-11. novembra in sta razpisana v informativnih glasilih za šolstvo.

Oba tečaja se pričneta ob 8.00 uri v knjižnici Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, Ljubljana.

Prosimo interesente, da se informativno javijo čimprej, za dokončno potrdilo udeležbe pa velja kopija položnice o plačilu - najkasneje tri dni pred pričetkom tečaja na naslov: Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 61111 Ljubljana (štev. žiro računa: 50101-678-52240).

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

OBČNI ZBOR DRUŠTVA

Obveščamo vse člane DVTS, da bo občni zbor v času 15. slovenskega vakuumskega posvetovanja, ki bo od 4. do 6. oktobra v Portorožu v sklopu 3. slovenske konference o materialih in tehnologijah (predvidoma v četrtek, 5.10.1995 ob 16.30). Na zboru bomo predstavili naše delovanje v preteklih letih, pogledali, kje smo in kaj zmoremo ter skušali čim jasneje podati smernice za delo v bodoče.

Prosimo člane, da si organizirajo svojo udeležbo na posvetovanju tako, da bodo na sestanku, ki bo trajal eno šolsko uro, in na katerem naj bi se vsako leto enkrat zbrali vsi, resnično prisotni.

Vabljeni,

Izvršni odbor DVTS

DRUŠTVENE NOVICE

ŠESTA VAKUUMSKA KONFERENCA ŠTIRIH DRŽAV Bled, 4.-7. april 1995

Na Bledu je bila od 4. do 7. aprila 1995 mednarodna vakuumska konferenca Slovenije, Madžarske, Hrvaške in Avstrije. Udeležili so se je strokovnjaki z univerz, inštitutov in industrije, ki delajo na naslednjih področjih: znanost o površinah materialov, materiali za elektroniko, uporabna znanost o površinah, tanke plasti, pridobivanje vakuuma in vakuumske tehnologije, vakuumska metalurgija in znanost o plazmi.

Vabljenih predavateljev je bilo 33 iz 19 držav. 15 svetovno priznanih strokovnjakov je predstavilo svoja dela v plenarnem delu, 7 je bilo uvodnih predavanj v posamezne sekcije in 11 vabljenih iz držav srednje Evrope.

Na konferenci je bilo 170 aktivnih udeležencev, kar pomeni, da je bila to manjša konferenca. Udeleženci so se med seboj dobro poznali in izmenjali najnovejše dosežke in izkušnje. Namenjena je bila vsem, predvsem mladim raziskovalcem, ki se zaradi finančnih ali drugačnih razmer ne morejo udeležiti svetovnih vakuumskih konferenc, ki so ponavadi večkrat v "eksotičnih" deželah, npr.: svetovni vakuumski kongres bo septembra na Japonskem.

Angleščina je bil uradni jezik konference. Mladi raziskovalci so se imeli možnost predstaviti širši strokovni

javnosti in si nabrati izkušnje za bodoče nastope na svetovnih kongresih.

Vabljeni predavatelji, ki so v plenarnem delu predstavili najnovejše dosežke s posameznih področij, so bili vsi povabljeni tudi na svetovni vakuumski kongres na Japonsko. To je dokaz, da je bil strokovni nivo vakuumske konference na Bledu zelo visok.

Zamisel za tovrstne, manjše konference se je porodila pri avstrijskih in madžarskih kolegih in je bila prvič realizirana leta 1979, v Györu, sledila je konferenca v Brunnu am Gebirge leta 1981. Leta 1985 so se konferenci v Debrecenu pridružili tudi vakuumisti takratne Jugoslavije in slovenskim vakuumistom je bila zaupana organizacija vakuumske konference treh držav, ki je bila leta 1988 v Portorožu. Leta 1991 pa je bila takšna prireditev združena z evropskim vakuumskim kongresom na Dunaju.

Politične spremembe v Evropi niso prekinile tradicije združevanja znanstvenikov Avstrije, Madžarske, Hrvaške in Slovenije, prav nasprotno, tovrstni majhni konferenci se želijo kot polnopravni člani pridružiti še znanstveniki Češke, Poljske in Slovaške, ki so se letos prvič udeležili konference v večjem številu. Vse dosedanje članice so se



Predsednica organizacijskega odbora JVC-6 doc.dr. Monika Jenko je na otvoritveni slovesnosti pozdravila goste in udeležence ter jim zaželela uspešno delo in prijetno bivanje na Bledu



Na sliki so z leve proti desni: dr. Milorad Milun, podpredsednik hrvaškega vakuumskega društva, prof.dr. Klaus Rendulic, predsednik avstrijskega vakuumskega društva, prof. dr. F. Vodopivec, predsednik programskega odbora, dr. Sandor Bohatka, podpredsednik madžarskega vakuumskega društva in mag. Andrej Pregelj, predsednik slovenskega vakuumskega društva

namreč strinjale, da organizacijo konference prevzame Slovenija, kar pomeni za nas izkazano priznanje za organizacijske sposobnosti in promocijo mlade države Slovenije.

Odziv na vabilo k sodelovanju je bil po pričakovanju sorazmerno ugoden, dobili smo 210 povzetkov referatov. Povabili smo 33 predavateljev, od tega je 15 uveljavljenih svetovno priznanih strokovnjakov, ki so najnovejša dela predstavili v plenarnem delu prvi dan konference v Festivalni dvorani na Bledu in zadnji dan v konferenčni dvorani hotela Park. Predstavljeno je bilo 42 govornih prispevkov v 7 sekcijah in 115 posterskih prispevkov v dveh sekcijah.

Organizacija konference z uradnim naslovom: Slovenian-Hungarian-Croatian-Austrian SIXTH JOINT VACUUM CONFERENCE, združene s "Third Meeting of Slovenian and Croatian Vacuum Scientists", je bila podeljena Društvu za vakuumsko tehniko Slovenije. Soorganizatorja sta bila Inštitut za kovinske materiale in tehnologije ter Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko.

Ministrstvo za znanost in tehnologijo je znanstveni sestanek finančno podprlo. Finančno pomoč EC, navkljub obljubam uradnikov v Bruslju in velikim prizadevanjem direktorja IMT ter pomoči generalnega sekretarja IU-VSTA, nam ni uspelo pridobiti zaradi zmanjšanja proračuna EC. Zato tudi nismo mogli podpreti večjega števila mladih strokovnjakov iz srednjeevropskih dežel.

Pokrovitelj konference je bila Mednarodna zveza za vakuumsko znanost, tehniko in uporabo, IUVSTA - International Union for Vacuum Science, Technique and Applications.

Slovenija je polnopravna članica omenjene zveze od leta 1992, prej pa je v njej aktivno delovala, v okviru jugoslovanske zveze vakuumskih društev s sedežem v Ljubljani od ustanovitve leta 1960.

Na koncu lahko sklenemo, da je bila konferenca zelo uspešna, tako po udeležbi kot tudi po visokem strokovnem nivoju. K uspehu pa je pripomogla tudi mati narava, ki nam je podarila čudovito lepe spomladanske dni. Nekateri udeleženci so bili prvič v Sloveniji in se kar niso mogli načuditi njenim lepotam. Vsi po vrsti so bili tudi izredno zadovoljni s hotelskimi storitvami hotela Park na Bledu.

Nepisano pravilo je, da mora vsaka dobra konferenca imeti predstavljena dela, natisnjena v zborniku. Organizacijski in programski odbor konference sta se izredno trudila, da bi izbrana dela objavili v eni od priznanih tujih strokovnih periodik. Ker je Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije imelo na voljo za organizacijo konference le slabo leto, nam ni uspelo zagotoviti dovolj denarnih sredstev za tisk "Proceedings-a" v angleški strokovni periodiki. Tako bodo predstavljena dela tiskana v priznani hrvaški reviji FIZIKA, dela s področja vakuumске metalurgije in materialov za elektroniko pa v reviji Kovine zlitine tehnologije, ki ima od 1. junija letos novega glavnega urednika in mednarodni uredniški odbor ter združuje področje kovinskih materialov, keramike, polimerov in materialov za vakuumsko tehniko in elektrotehniko.

Poleg tega bo uredniški odbor poskušal že številko, kjer bodo tiskana dela, predstavljena na konferenci na Bledu, vključiti med citirane po SCI.



Minister za znanost in tehnologijo Slovenije prof. dr. Rado Bohinc med pozdravnim nagovorom



Med vabljenimi predavatelji je bil tudi dolgoletni prijatelj slovenskih vakuumistov, bivši predsednik IUVSTA prof. Jose de Segovia iz Španije

73. SEJA IZVRŠNEGA ODBORA MEDNARODNE ZVEZE ZA VAKUUMSKO ZNANOST, TEHNIKO IN UPORABO - IUVESTA Brdo, 7.-9. april 1995

Po končani vakuumski konferenci na Bledu sta Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije ter Inštitut za kovinske materiale in tehnologije gostila mednarodno zvezo IUVESTA na Brdu pri Kranju. IUVESTA je imela 73. sejo, ki je bila zelo pomembna, saj je bila zadnja pred generalno skupščino, ki bo jeseni v Jokohami, in kjer bo izvoljeno novo vodstvo. Udeležili so se je predstavniki 22 držav,

bilo je 45 udeležencev. Po ustaljeni navadi mora društvo, ki gosti zvezo, pripraviti manjšo ekskurzijo, tako da se člani IUVESTA seznanijo z deželo gostiteljico. DVT Slovenije je priredilo ogled Bleda in Ljubljane ter Postojnske jame. Seja izvršnega odbora te mednarodne zveze je v vseh pogledih uspela, o čemer pričajo tudi zahvalna pisma.

Učna delavnica: STRUKTURA IN REAKTIVNOST MAJHNIH POLIATOMSKIH MOLEKUL NA POVRŠINAH Brdo, 9.-15. april 1995

Od 9. do 15. aprila 1995 pa je bila na Brdu pri Kranju v hotelu Kokra mednarodna učna delavnica s področja znanosti o površinah na temo "THE STRUCTURE AND REACTIVITY OF SMALL POLYATOMIC MOLECULES ON SURFACES". Delavnice so se udeležili samo vabljeni predavatelji, najboljši na svetu iz posameznih tematskih področij. Predavatelje je povabil k sodelovanju organizacijski odbor IUVESTA, ki ga zastopata svetovno priznana strokovnjaka, ki se ukvarjata z raziskavami na površinah, prof. Phil D. Woodruff, z univerze Coventry Warwick, iz Velike Britanije, ki je avtor cele vrste strokovnih in učnih knjig s to tematiko, ter prof. Ali Bradshaw iz Inštituta Fritz Haber v Berlinu, ki je ob enem član sekcije Interfaces in Chemistry v COST-u.

Organizacijo delavnice sta prevzela DVTS in Inštitut za kovinske materiale in tehnologije in na ta način pripomo-

gel k uveljavljanju Slovenije tudi v strokovnem svetu. Slovenija na področju znanosti o površinah šele orje ledino, kajti oprema, ki je nujno potrebna za tovrstno raziskovanje je izredno draga in nam večinoma dosegljiva le pri nekaterih centrih v okviru mednarodnega sodelovanja oz. mednarodnih projektov.

Oba znanstvena sestanka in tudi seja IUVESTA so odlično uspeli. Zahvala za uspeh gre v prvi vrsti direktorju IMT, ki je ob enem tudi član IO DVTS, organizacijskemu in programskemu odboru, aktivnim članom DVTS, sodelavcem IMT in IEVT in seveda Ministrstvu za znanost in tehnologijo za finančno podporo.

dr. Monika Jenko,

Inštitut za kovinske materiale in tehnologije
61000 Ljubljana



Udeleženci učne delavnice na Brdu

Odlomka iz zahvalnih pisem, ki sta jih predsednici organizacijskega odbora dr. Moniki Jenko in predsedniku programskega odbora prof. dr. Francu Vodopivcu poslala prof. John Collegon, generalni sekretar IUVESTA, in prof. dr. Theodore E. Madey, predsednik IUVESTA.

It was a great pleasure to meet you in Bled and participate in your recent conference. The conference attracted some very good papers and I am most grateful to you and the programme committee for the opportunity to attend as an invited speaker. Please convey my thanks to your colleagues and to your Ministry of Science for providing financial support.

John Collegon

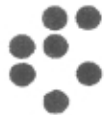
Every aspect of the ECM meetings was excellent, from the superb venue in Brdo, to the delicious banquets hosted by the Slovenian Vacuum Society, to the pleasant excursion through the Slovenian countryside. Our IUVESTA delegates will long remember the warm hospitality of our Slovenian hosts. The committee meetings and EC meeting were unusually productive, and your considerable efforts helped to insure their success. Thank you very much!

TEC

Univerza v Ljubljani

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija

61111 Ljubljana, Jamova 39 / p.p. 100 / Tel.: 061 17 73 900 / Fax.: 061 219 385



Odsek za keramiko organizira

IZOBRAŽEVANJE NA PODROČJU KERAMIČNIH MATERIALOV

Odsek za keramiko na Institutu Jožef Stefan pripravlja izobraževalne programe za strokovnjake, ki delajo ali šele iščejo informacije na področju keramičnih materialov. Organiziramo seminarje, ki obsegajo predavanja in razgovore po izbiri naročnika. Prav tako prilagajamo zahtevam udeležencev seminarja obseg in nivo predavanj na posameznih temah. Na željo in v okviru možnosti organiziramo tudi praktično delo v naših laboratorijih.

Osnovni seminar obsega 30 ur in vključuje naslednje teme:

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

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

PODJETJE **BALZERS** VAM PO UGODNIH CENAH NUDI NASLEDNJO DEMO-OPREMO:

kom. KODA	... opis	kom. KODA	... opis
1	PP W20 000 . . . WKP 250, ROOTS VAKUUMSKA ČRPALKA	1	BP B10 250 . . . URB 040, KATALITIČNA PAST
1	PK D32 305-A . . . UNO 004 B, ROTACIJSKA ČRPALKA	3	PM P01 320 . . . TPH 240, TURBOMOLEKULAR. ČRPALKA
1	PK D34 305-A . . . UNO 016 B, ROTACIJSKA ČRPALKA	1	BP V43 000 . . . EVC 010M, KOTNI VENTIL
3	BP R01 506 . . . UNO 100, ROTACIJSKA ČRPALKA	1	BP V09 000 . . . RME 010, REGULATOR
4	PK D24 602 C . . . DUO 030 A, ROTACIJSKA ČRPALKA	1	BG D04 768 . . . IMG 060, MERILNIK VAKUUMA
3	PM P01 230-AA . . . TPH 330, TURBOMOLEKULARNA ČRPALKA	1	BP V16 001 . . . EVA 016 P, ELEKTROPNEVMAT. VENTIL
1	PM P01 570 . . . TPH 180 H, TURBOMOLEKULARNA ČRPALKA	2	BP V15 001 . . . EVA 040 P, ELEKTROPNEVMAT. VENTIL
1	PM C01 200-A . . . TPC 270, NAPAJALNIK	1	B 8009 501 PC . . . POLYCOLD PFC 500
7	PM P01 210 AA . . . TPH 170, TURBOMOLEKULARNA ČRPALKA	Oprema je bila uporabljena na razstavah in po uporabi pregledana ter preizkušena ponudba z vključeno garancijo velja do odprodaje zalog.	
1	PM P01 760 . . . TPH 450 H, TURBOMOLEKULARNA ČRPALKA	Za morebitno ponudbo ter ostale informacije se lahko obrnete na podjetje SCAN D.O.O. , tel.: 064-45-383, fax: 064-45-050.	
1	PM P01 180 . . . TPH 510, TURBOMOLEKULARNA ČRPALKA		
8	PM C01 259 A . . . TCP 300, NAPAJALNIK		
1	BG D16 027 T . . . PG 100, MERILNIK VAKUUMA		

BALZERS - HIGHLIGHTS 1995



Pumping system TMH 1600 M and UNIDRY DBP 050

DBP 050 Dry backing pump

Features:

- Three stage design
- Valveless
- Temperature Management for the prevention of condensation
- Insensitive to liquids
- Water cooled canned motor for maximum tightness
- Serial interface RS 232

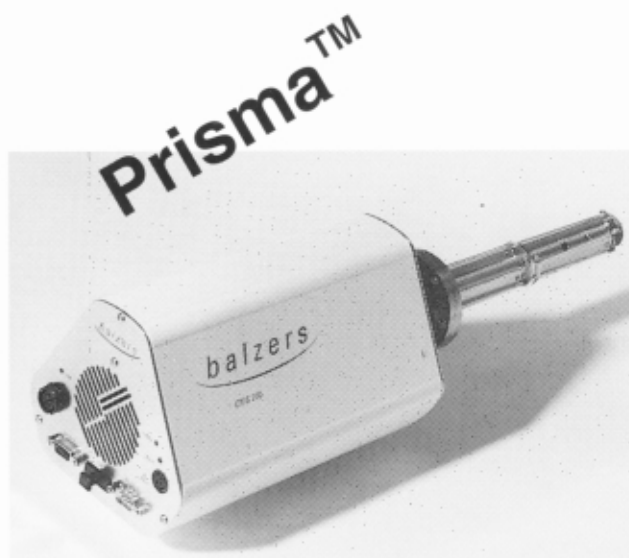
QMS 200

Quadrupole mass spectrometer

The simple approach to high performance gas analysis

Cost effective trouble shooting for any vacuum application:

- Total freedom to operate manually
- LAN fiberoptic communication for fast interference-free multiplexing
- Easy integration into existing process tools



Balzers Hochvakuum GesmbH
Diefenbachgasse 35
A-1150 Wien
Tel.: (+43-1) 894 17 04
Fax: (+43-1) 894 17 07

Local cooperation partner:
Mr. Slavko Zizek c/o Scan d.o.o.
Zastopnisko Servisno Podjetje
Breg ob Kokri 7
SLO-64205 Preddvor
Tel.: (064) 45 383
Fax: (064) 45 050

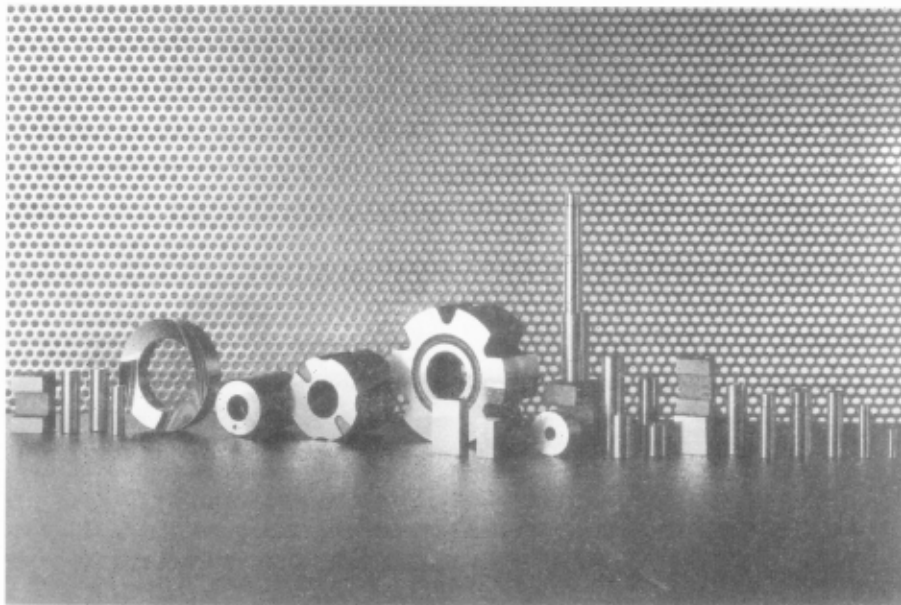


61000 Ljubljana, Stegne 37

Tel.: +386 61 576 759, 574 711

Fax: +386 61 159 26 69

TRDNI MAGNETNI MATERIALI IN SINTRANI DELI PO STANDARDU ISO 9001



PROIZVODNI PROGRAM:

- anizotropni in izotropni trajni kovinski magneti, izdelani na podlagi zlitine AlNiCo
 - po postopkih ulivanja - **LIMAG**
 - po postopkih sintranja - **SIMAG**
- visokoenergijski magnetni materiali na podlagi zlitin redkih zemelj s kobaltom in brez njega - magneti **REMAG**
- magnetni sistemi za vgradnjo v najrazličnejše sklope

DODATNI NOVI PROIZVODNI PROGRAMI:

- **toplotna obdelava** visokolegiranih jekel v vakuumu
- **nemagnetni sintrani izdelki** na podlagi železovih zlitin
- **inženiring** na področju izdelave metalurške opreme, merilne tehnike za vrednotenje magnetnih meritev ter naprav za magnetenje in razmagnetenje



SCAN d.o.o., zastopniško servisno podjetje, Breg ob Kokri 7, 64205 Preddvor, Slovenija
Tel. +386 64 45 383, Fax +386 64 45 050, ŽR : 51500-601-18897

CELOVITA PONUDBA OPREME LABORATORIJEV ZA ELEKTRONSKO MIKROSKOPIJO



Vrstični elektronski mikroskop JEOL JSM-5800

SPECIALNA VARJENJA

Na IEVT smo zaradi lastnih potreb razvili spajanja različnih materialov. Med njimi je varjenje zelo pomembno. Obdelali smo ga s stališča oblikovanja spojev, izdelave varjencev, čiščenja, zaščitnih atmosfer, vpenjanja in hlajenja, varilnih parametrov in končne obdelave zvarov. Kontrolo tesnosti spojev izvajamo po standardnih postopkih za merjenje puščanja vakuumskih sistemov in komponent in s tem zagotavljamo visoko stopnjo kvalitete izdelkov.

TIG

- varjenje nerjavnih pločevin 0.1-3 mm
- varjenje bakrenih pločevin 0.2-1.5 mm
- varjenje na rotacijski ali koordinatni napravi
- varjenje v zaščitnih komorah
- ščitenje korena zvara z inertnimi ali drugimi plini

MIKROPLAZMA

- varjenje nerjavnih pločevin, kovarja itd. debeline 0.08-0.5 mm
- varjenje na rotacijski ali koordinatni napravi

LASER

- varjenje različnih materialov od debeline nekaj mikrometrov do 0.3 mm
- doravnavanje (trimanje) neparjenih plasti na steklu
- varjenje tankih pločevin, žic ali cevk ter neparjenih plasti
- varjenje na računalniško vodeni koordinatni mizici
- varjenje na rotacijski napravi
- varjenje v različnih zaščitnih atmosferah
- označevanje in pisanje po različnih materialih z računalniškim programom

TOČKOVNO VARJENJE

OBDELAVE POVRŠIN PO VARJENJU

- čiščenje (topila, UZ, deionizirana voda, sušenje...)
- peskanje s steklenimi kroglicami
- elektropoliranje
- preizkušanje tesnosti varjencev
- preizkušanje s helijevim leak-detektorjem
- poročila in atesti o velikosti puščanja
- vsi spoji so po želji testirani individualno



INŠTITUT
ZA ELEKTRONIKO
IN VAKUUMSKO
TEHNIKO p.o.

TESLOVA ULICA 30, POB 59, 61111 LJUBLJANA,
SLOVENIJA
TELEFON: (061) 123-12-07, 123-13-14, 263-461
TELEFAX: (061) 263-098, TELEX: 39714 IEVT

MEDIVAK

MEDIVAK, d.o.o.
Šolska ulica 21
SLO - 61230 Domžale

tel. fax : 00386 61 713060
mobitel : 0609 615 455
žiro račun : 50120-601-114647

**ZASTOPSTVO
SERVIS
SVETOVANJE**

LEYBOLD

SPECTRO

Vakuumske naprave, izmenjevalniki, analitski aparati
Vakuumske tehnologije, vakuumska metalurgija, trde in tanke plasti, analitika
Kontrola vakuumskih naprav in sistemov

PRODAJNI PROGRAM "LEYBOLD"

Vakuumske črpalke

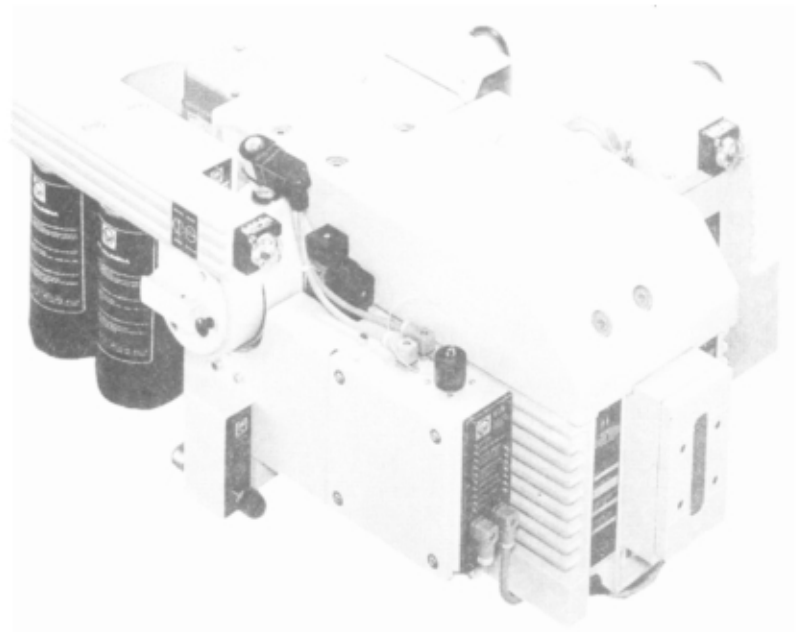
- Rotacijske vakuumske črpalke s priborom
- Eno in dvostopenjske (1 do 1200 m³/h)
- Roots vakuumske črpalke - RUVAC (150 do 13000 m³/h)
- Membranske in ejektorske vakuumske črpalke - DIVAC 2,4 L
- Difuzijske črpalke
- Turbomolekularne črpalke (50 do 4500 l/s)
- Sorpcijske črpalke, kriočrpalke, ionsko-getske in sublimacijske titanske črpalke

Vakuumski črpalni sistemi

- za kemijsko in drugo industrijo

Vakuumski ventili

- Varnostni, dozirni
- Kroglični, loputni in UVV
- Prehodni in kotni KF, ISO-K, ISO-F



Vakuumski elementi in prirobnice

- Serije KF, ISO-K, ISO-F in

Mehanske in električne prevodnice Merilniki vakuuma in kontrolni instr.

- Absolutni merilniki in merilec delnih tlakov (od 1.10⁻¹² do 2000 mbar)

Procesni regulatorji

Detektorji netesnosti (puščanja)

- Helijski in freonski detektorji

Masni spektrometri s priborom

Vakuumska olja, masti, rezervni deli



SPECTRO
Analytical Instruments

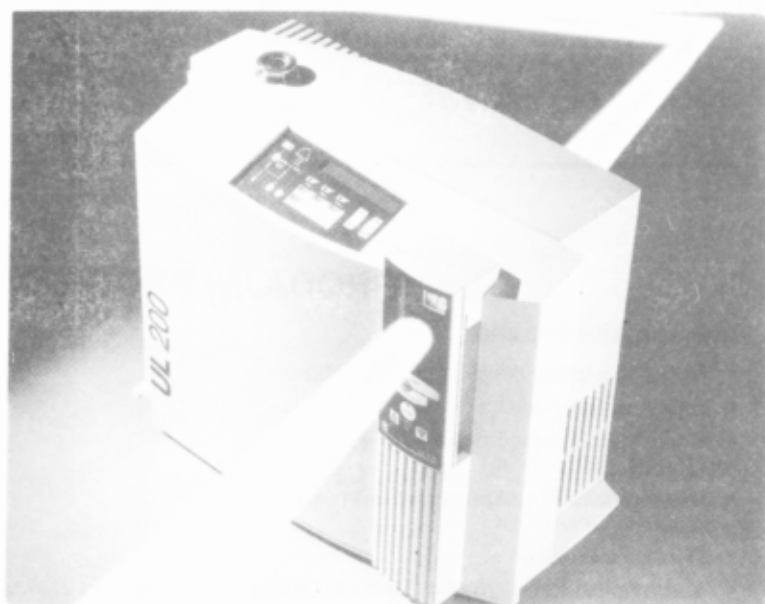
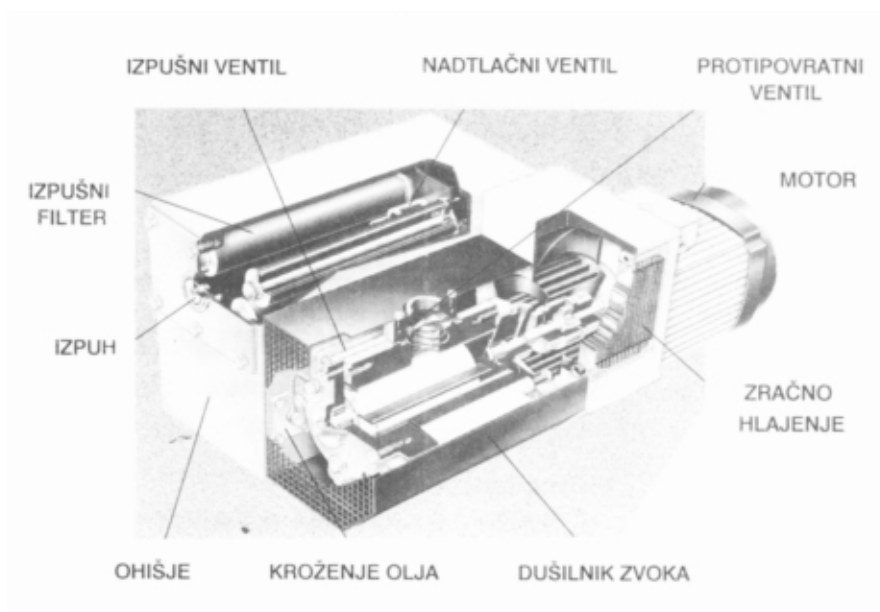
MEDIVAK

MEDIVAK, d.o.o.
Šolska ulica 21
SLO - 61230 Domžale

tel. fax : 00386 61 713060
mobitel : 0609 615 455
žiro račun : 50120-601-114647

HITRA POMOČ V TEŽAVAH**ODKRIVANJE NETESNOSTI****Helijski masni spektrometer UL 100 PLUS**

- vakuumski sistemi
- vakuumski agregati
- nizko- in visokotlačne posode
- ventili, spoji
- energijske postaje

**IZPOSOJA VAKUUMSKIH
ČRPALK LEYBOLD****24 URNI SERVIS**

- vakuumskih črpalk
- analiznih aparatov
- odkrivanje netesnosti

**IZOBRAŽEVANJE****S področja****ODKRIVANJE NETESNOSTI
POPRAVILA ČRPALK**

Tečaje organiziramo na sedežu firme v Domžalah,
če se prijavi najmanj 6 oseb.

MEDIVAK

MEDIVAK, d.o.o.
Šolska ulica 21
SLO - 61230 Domžale

tel. fax : 00386 61 713060
mobitel : 0609 615 455
žiro račun : 50120-601-114647

UGODNO!

UGODNO!

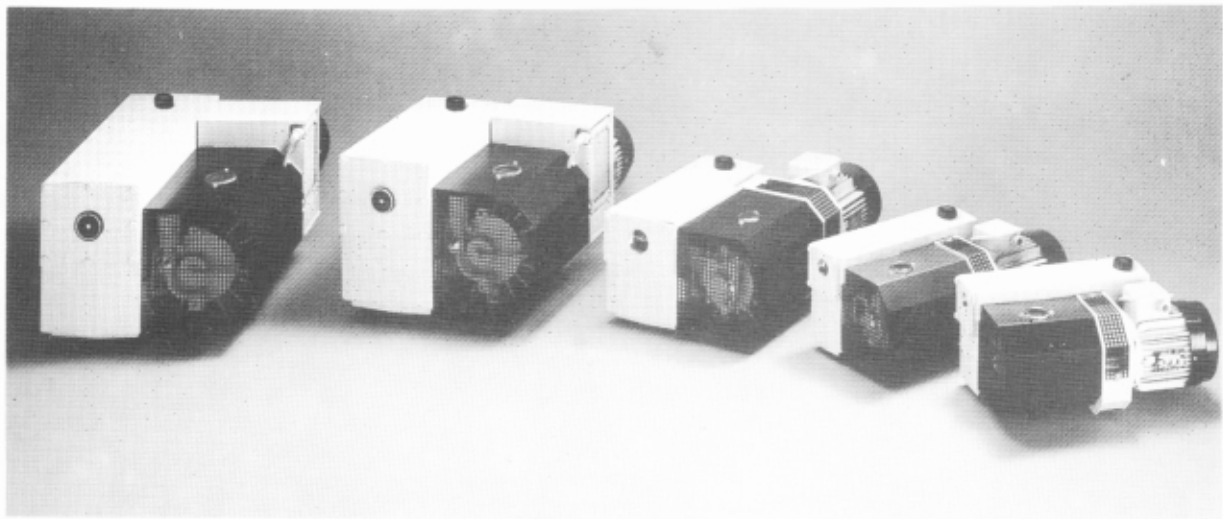
UGODNO!

POPUST

do **20 %**

Velja do 31.8.1995

Za vakuumske rotacijske črpalke **SOGEVAC**



Tehniški podatki

- Črpalna hitrost 16 do 1.200 m³/h
- Vakuum 0,1 do 1000 mbar
- Moč motorja 0,55 do 11 kW
- Priklj. napetost 220/380 V
- Teža 23 do 130 kg

- Zelo tiho delovanje
- Vsebnost olja v izpuhu 0.0001 %
- Kompaktna konstrukcija
- Velika črpalna hitrost
- Enostavna za vzdrževanje
- Servis zagotovljen

Uporaba

- Avtomobilska industrija
- Letalska in pomorska industrija
- Kemijska in petrokemijska industrija
- Elektro in elektromehanska industrija
- Elektronika
- Proizvodnja hrane (sušenje, vakuumsko pakiranje, hlajenje, transport hrane, degaziranje, etiketiranje, ...)
- Steklarska in keramična industrija
- Laboratoriji
- Laserska tehnika
- Medicina
- Metalurgija, strojništvo
- Farmacevtska in kozmetična industrija
- Lesna industrija
- Plastična in gumarska industrija



**Samo najboljši ljudje lahko uglasijo vaše analitske
instrumente s področja biotehnologije,
atomske spektroskopije, ICP, ICP-MS,
LC, elementne analize, termične
analize, upravljanja podatkov,
LC-MS, GC-MS, UV/VIS,
GC - IR, FT - IR
in fluores-
scen-
ce.**



KemoAnalitika

**družba z omejeno odgovornostjo
zastopstvo Perkin Elmer za Slovenijo**

Štrekljeva 3, Ljubljana

tel. 061 7 125 03 15, 061 / 125 11 05

fax 061 / 125 11 10