

ICONISMUS XI



VAKUUMIST

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



47 let
DVTS

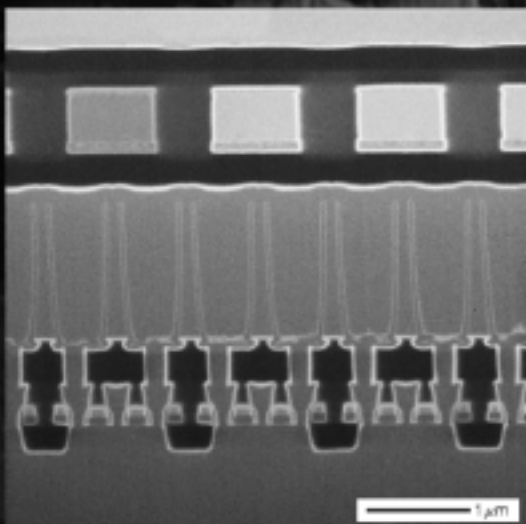
LJUBLJANA, DECEMBER 2006

ISSN 0351-9716

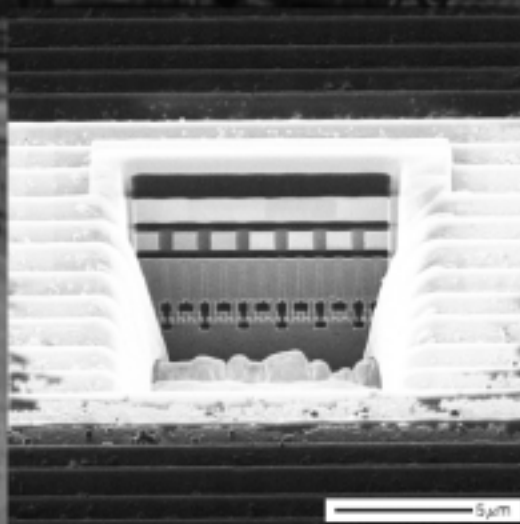
LETNIK 26, ŠT. 4 2006

UDK 533.5.62:539.2:669-982

JEOL Simple specimen-preparation tool



High resolution SIM Image



High speed processing

*High speed and
point fabrication*



Model JEM-9310FIB

SCAN d.o.o. Slovenija

Breg ob Kokri 7 • SI-4205 Preddvor • Tel.: +386 (0)4 2750 200 • Faks: +386 (0)4 2750 240 • scan@siol.net

VSEBINA

ČLANKI

* Tehnologija fokusiranega ionskega curka (FIB) (Franc Zupanič)	4
* Obdelava umetnih žil s kisikovo plazmo (Ita Junkar, Nina Hauptman, Uroš Cvelbar, Janez Kovač, Miran Mozetič)	10
* Inženiring površine izdelkov in polizdelkov iz aluminijevih zlitin (Varužan Kevorkijan)	14
* Peterlinov prispevek k razvoju vakuumskih tehnik (Stanislav Južnič)	19
* Slovenska znanost in industrija se povezuje – Posvet o naprednih materialih 2006 na Institutu "Jožef Stefan" (Špela Stres)	30

NASVETI

* Plini za pripravo vakuumskih (PVD) tankih plasti (Peter Panjan)	33
---	----

Obvestilo
Naročnike Vakuumista prosimo,
da čim prej poravnate naročnino
za leto 2006.
Cena števil, kolikor jih bo izšlo
v letu, je 4000,00 tolarjev
(16,69 EUR).

SPONZORJI VAKUUMISTA:

- Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo
- PFEIFFER Vacuum Austria GmbH

VAKUUMIST

Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije

Glavni in odgovorni urednik: dr. Peter Panjan

Uredniški odbor: dr. Miha Čekada, mag. Andrej Demšar, dr. Jože Gasperič (urednik za področje vakuumске tehnike in sistemov), dr. Bojan Jenko, dr. Monika Jenko (urednica za področje vakuumске metalurgije), dr. Stanislav Južnič, dr. Janez Kovač, dr. Ingrid Milošev, dr. Miran Mozetič, dr. Vinko Nemanič, dr. Boris Orel, mag. Andrej Pregelj, dr. Janez Šetina, dr. Alenka Vesel in dr. Anton Zalar

Tehnični urednik: Miro Pečar

Lektor: dr. Jože Gasperič

Korektor: dr. Miha Čekada

Naslov: Uredništvo Vakuumista, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 1000 Ljubljana, tel. (01) 477 66 00

Elektronska pošta: DVTS.group@guest.arnes.si

Domača stran DVTS: <http://www2.arnes.si/~ljdvts/>

Vakuumist on-line: <http://www2.arnes.si/~ljdvts/slo/arhiv.htm>

Številka transakcijskega računa pri NLB: 02083-0014712647

Oblikovanje naslovne strani: Ignac Kofol

Tisk: Littera picta, d. o. o., Rožna dolina, c. IV/32–36, 1000 Ljubljana

Naklada: 400 izvodov

Menjalni tečaj: 1 EUR = 239,64 SIT

TEHNOLOGIJA FOKUSIRANEGA IONSKEGA CURKA (FIB)

Franc Zupanič

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor

POVZETEK

Fokusirani ionski curek (FIB) ima premer od 5 nm do nekaj mikrometrov. Ko ga uporabljamo kot mikroskop, je njegova ločljivost nekoliko slabša, kot je ločljivost vrstičnega elektronskega mikroskopa, vendar ima bistveno boljši orientacijski kontrast. Z njim lahko odvezujemo ali nanašamo material na izbranih mestih z natančnostjo vsaj 100 nm. Ta značilnost omogoča, da se uporablja v najrazličnejše namene, od popravila elektronskih vezij, preko 3D-mikroskopije, do izdelave najrazličnejših 3D-objektov v nano- in mikrometrskem področju. Kombinacija fokusiranega ionskega curka in vrstičnega elektronskega mikroskopa bistveno izboljša zmogljivosti obeh.

Technology of focussed ion beam (FIB)

ABSTRACT

Focussed ion beam has a diameter between 5 nm and a few micrometers. Its resolution is slightly worse than that of a scanning electron microscope; however, it possesses much better orientation contrast. It allows site-specific sputtering and deposition of materials with precision of at least 100 nm. This ability allows FIB application in different fields: repairing of electronic circuits, 3D-microscopy, 3D-fabrication of objects in nano- and micro regions. The combination of a scanning electron microscope and a FIB provides enhanced capabilities of both.

1 UVOD

Želja po izdelavi čim manjših komponent in njihova natančna postavitev v čim manjša področja je ena izmed gonilnih sil pri razvoju novih tehnologij. Miniaturizacija komponent je bila značilna že za obdobje mikroelektronike, z razvojem nanomaterialov in nanotehnologij pa je še pridobila na pomenu. Z zmanjšanjem velikost sestavnih delov postajajo vedno bolj pomembna tudi orodja, s katerimi jih lahko izdelujemo, obdelujemo, preiskujemo, popravljamo in nadgrajujemo.

Eno izmed takšnih orodij je fokusirani ionski curek, ki ga navadno imenujemo s kratico FIB (iz angl. Focussed Ion Beam). Prvo takšno napravo, ki je imela tekočkovinski izvir ionov, je uspelo izdelati Selingerju in sodelavcem ⁽¹⁾ leta 1979. Pokazali so, da ima ionski curek veliko intenziteto in da ga je mogoče fokusirati. Od takrat naprej poteka hiter razvoj teh naprav, močno pa se veča tudi število področij, na katerih se uporablja.

Fokusirani ionski curek, ki ima premer od 5 nm do nekaj mikrometrov, ima tri glavne naloge:

- odstranjevanje materiala
- nanašanje materiala
- mikroskopiranje

Majhen premer ionskega curka omogoča, da lahko z veliko natančnostjo odstranjujemo material z izbra-

nih mest. To lastnost lahko koristno uporabimo pri mikroobdelavi materialov, izdelavi prečnih prereзов, raziskavi napak na površini oziroma tik pod njo ipd.

Ionski curek lahko povzroči razkroj plinastih molekul, ki se adsorbirajo na površino materiala. Pri tem lahko nastanejo na mestu delovanja ionskega curka izparljive snovi, ki bistveno povečajo hitrost odstranjevanja materiala, ali pa neizparljivi nanosi. Slednji postopek se imenuje nanašanje prevlek z ionskim curkom ali na kratko FIB CVD.

Fokusirani ionski curek lahko uporabljamo tudi kot mikroskop. Za upodobitev navadno uporabimo sekundarne elektrone, ki jih inducira ionski curek, lahko pa tudi sekundarne ione. Ločljivost je nekoliko manjša kot pri vrstičnem elektronskem mikroskopu (med 5 nm in 10 nm), mnogo bolje pa loči med seboj kristalna zrna, ki se razlikujejo v orientaciji (orientacijski kontrast). V sistemih z dvojnimi elektronskim in ionskim curkom (slika 1) lahko primerjamo mikroposnetke, nastale na različne načine, oziroma kar je še boljše: z elektroni opazujemo učinek ionskega curka neposredno med delom.

O fokusiranem ionskem curku obstajata dve kakovostni monografiji^(2,3), ki sta bili izdani v zadnjih letih, in ju zainteresiranim bralcem toplo priporočamo. Kolikor je znano, v slovenščini o FIB-u še ni nobenega članka, zato želimo v tem prispevku najprej prikazati značilnosti zgradbe FIB-a, vrste interakcij ionov s snovjo ter v največji meri možnosti uporabe fokusiranega ionskega curka.

2 ZGRADBA NAPRAVE FIB

Osnovna naprava FIB je zgrajena iz vakuumskega sistema in komore, tekočkovinskega izvira elektronov, ionske kolone, detektorjev, sistema za dovod plinov za nanašanje in računalnika, ki krmili celotno napravo. Njegova zgradba je zelo podobna vrstičnemu elektronskemu mikroskopu. FIB je lahko samostojna naprava, pogosto pa ga vgrajujejo v druge analitične naprave, kot so vrstični elektronski mikroskop (SEM), Augerjev elektronski spektroskop (AES), presevalni elektronski mikroskop (TEM) in masni spektrometer sekundarnih ionov (SIMS). Najpogostejši je sistem z dvojnimi elektronskim in ionskim curkom FIB-SEM (slika 1).

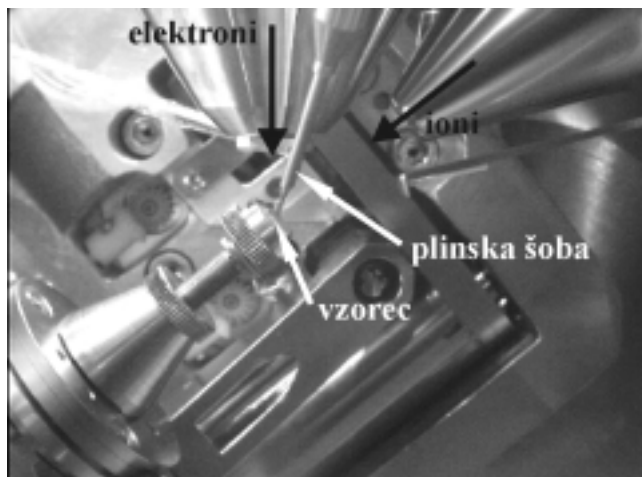
Osnova FIB-a je tekočkovinski izvir ionov (v angl. liquid metal ion source, LMIS). Ta lahko zagotavlja ionski curek s premerom od 5 nm do nekaj mikrometrov. Na sliki 3 je shematičen prikaz ionskega



Slika 1: Naprava z dvojnimi elektronskim curkom Quanta 3D, FEI Company, ki je instalirana v Univerzitetnem centru za elektronsko mikroskopijo Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru

izvira. Volframova igla, ki jo lahko segrevamo, je povezana z rezervoarjem kovine, ki jo ioniziramo. V komercialnih napravah je najbolj razširjen element galij. Razlogov za to je več:

- Galij ima nizko tališče ($T_f = 29,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), zato je možnost za reakcijo z volframom in za medsebojno onesnaženje tekoče kovine in podlage zanemarljiva.
- Galij ima majhno topnost v volframu, volfram pa v galiju.
- Galij ima pri temperaturi tališča zelo nizek parni tlak, zato ga lahko uporabljamo v čisti obliki (ne kot zlitino) in zato so njegove izgube zaradi izparovanja majhne. Slednje zagotavlja dolgotrajno delovanje (okoli $380\text{ }\mu\text{Ah/mg}$).

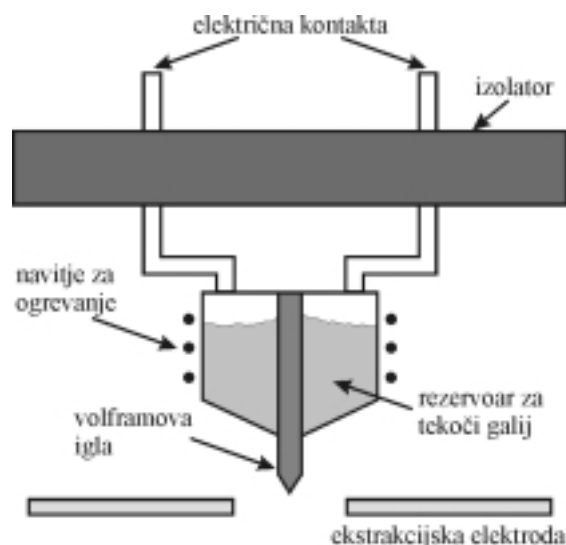


Slika 2: Notranjost komore

- Galij ima zelo majhno površinsko prosto energijo, zato z lahkoto in dobro omoči volframovo podlago.
- Galij ima veliko površinsko napetost, kar omogoča stabilen nastanek ionov pod vplivom visoke električne napetosti.
- Galij zagotavlja veliko kotno intenziteto ionov in majhen raztros energije.

Volframova igla (podlaga) ima valjasto obliko, ki se konča v obliki stožca s polovičnim notranjim kotom okoli 49° , polmer vrha stožca je okoli $10\text{ }\mu\text{m}$. Med delovanjem tekoči galij omoči podlago, visoka napetost nasprotne elektrode (ekstrakcijske elektrode) pa povzroči, da tekoči galij na konici igle oblikuje tako imenovani Taylorjev stožec, ki pomeni ravnovesno stanje med električnim poljem in površinsko napetostjo galija. Zunanji kot Taylorjevega stožca je $130,7^{\circ}$, njegova površina pa je ekvipotencialna ploskev. V močnem električnem polju jakosti okoli 10^{10} V/m atomi galija izparevajo z vrha Taylorjevega stožca (poljsko izparovanje) in se ionizirajo. Stabilno delovanje izvira se doseže, če je emisijski tok ionov $1\text{--}3\text{ }\mu\text{A}$, gostota toka pa je $\approx 10^8\text{ A/cm}^2$. Izparjeni atomi galija se nadomestijo s tokom galija iz rezervoarja do konice Taylorjevega stožca. Pri stabilnem delovanju izvira so v ionskem curku pretežno le enkrat ionizirani ioni.

Ionski izvir vedno deluje s konstantnim tokom. Pri delu potrebujemo različne tokove; od 1 pA pri izdelavi mikroposnetkov do nekaj deset nanoamperov za grobo odzemanje materiala. Dosežemo jih z ustreznimi zaslonkami, ki prepuščajo le želen ionski tok. Ionski curek usmerjamo in premikamo po površini vzorca z oktopolnimi lečami, s katerimi lahko ionski curek tudi fokusiramo in odpravljamo astigmatizem. V odvisnosti od ionskega toka je premer ionskega curka na površini vzorca med 5 nm in nekaj mikrometri.



Slika 3: Shema tekočkovinskega izvira ionov

3 INTERAKCIJA IONSKEGA CURKA S TRDNINO

Zmožnost odstranjevanja in nanašanja materiala ter upodabljanja s fokusiranim ionskim curkom FIB je odvisna od narave interakcij ionski curek-trdnina. Nekaterne možne interakcije so prikazane na sliki 4. Odstranjevanje materiala je rezultat fizikalnega razprševanja tarče. Razprševanje je posledica več elastičnih trkov, pri katerih se energija vpadnega iona prenese na atome znotraj kaskade izbitih atomov. Atom na površini lahko postane razpršen atom, če prejme kinetično energijo, ki je večja od površinske vezavne energije materiala tarče. Del razpršenih atomov se lahko ionizira. Uporabimo jih lahko za upodobitev s sekundarnimi ioni ali pa za masno analizo. Poleg elastičnih trkov se pojavljajo tudi neelastični, pri katerih nastanejo v tarči fononi, plazmoni in tudi sekundarni elektroni, ki jih uporabljamo za upodobitev. Slednje lahko imenujemo sekundarni elektroni, inducirani z ionskim curkom.

Pri interakciji ionskega curka s trdnino se zmanjšuje kinetična energija ionov, ki se na koncu ustavijo v trdnini; torej se vanjo implantirajo. Simulacija Monte Carlo (SRIM)⁽⁴⁾, ki je prosto dostopna na internetu, omogoča napoved interakcij ionov s snovjo. Simulacija omogoča izračun razpršitvenih koeficientov za poljubne materiale, ki imajo amorfnu zgradbo. Razpršitveni koeficient je najmanjši, če je ionski curek pravokoten na površino ($\theta = 0^\circ$), največji pa je pri kotu $\theta \approx 80^\circ$. Za večino elementov je razpršitveni koeficient pri $\theta = 0^\circ$ med 1 in 10 atomi/ion. Pri kristalnih snoveh se pojavi **kanalski pojav**. Če je smer ionskega curka vzporedna smeri z majhnimi Millerjevi indeksi kristala, je globina penetracije mnogo večja, kot jo napove simulacija Monte Carlo amorfne tarče. V teh smereh bosta mnogo manjša tako razpršitveni koeficient kot tudi število nastalih sekundarnih elektronov. Hitrost odstranjevanja materiala lahko povečamo v nekaterih primerih tudi za deset- in večkrat z uvajanjem reaktivnih plinov, kot so

Cl_2 , Br_2 , I_2 , XeF_2 in H_2O , ki z atomi tarče na mestih, kamor je usmerjen ionski curek, tvorijo izparljive reakcijske produkte.

Fokusirani ionski curek lahko uporabljamo tudi za nanašanje materiala. Ionski curek lahko povzroči razkroj plinastih molekul, ki se adsorbirajo na površino materiala. Pri tem nastane na površini neizparljiva plast. Postopek se imenuje nanašanje prevlek z ionskim curkom ali na kratko FIB CVD. Najpogostejši kovini, ki ju nanašamo, sta Pt in W. Plina, ki se uporabljata, sta organokovinska spojina $\text{C}_7\text{H}_{17}\text{Pt}$ in volframov karbonil $\text{W}(\text{CO})_6$. Nanosa nista čisti kovini, temveč vsebujeta še ogljik, galij in kisik, vendar imata kljub temu sorazmerno majhno električno upornost, da se lahko uporabljata za električne kontakte v elektronskih vezjih. Uporabljata se tudi za zaščito površin na mestih, kjer odstranjujemo material z ionskim curkom, ter omogočata natančnejše in bolj gladke reze. Prekurzor za ogljik je fenantren ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$), ki je zelo primeren za ustvarjanje 3D-objektov, ki imajo velikost v nano- in mikrometrskem območju. To je možno tudi s platino, vendar je hitrost nanašanja manjša, velikost objektov pa ne more biti tako majhna kot pri ogljiku. Nanašamo lahko tudi spojine, npr. v elektronskih vezjih izolator SiO_2 .

4 PRIMERI UPORABE

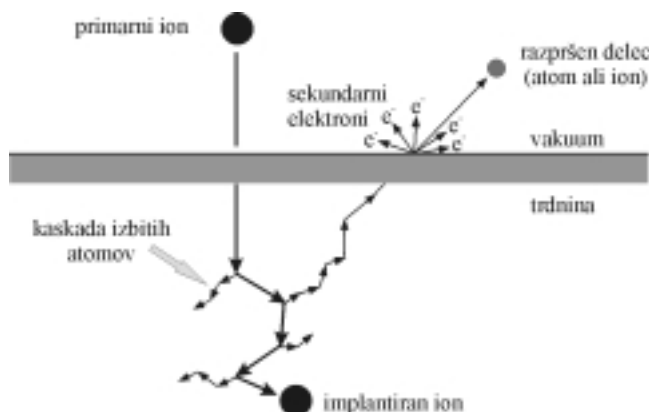
FIB lahko uporabljamo za najrazličnejše naloge. V nadaljevanju bomo opisali predvsem take, ki jih izvajamo tudi sami.

4.1 Mikroobdelava

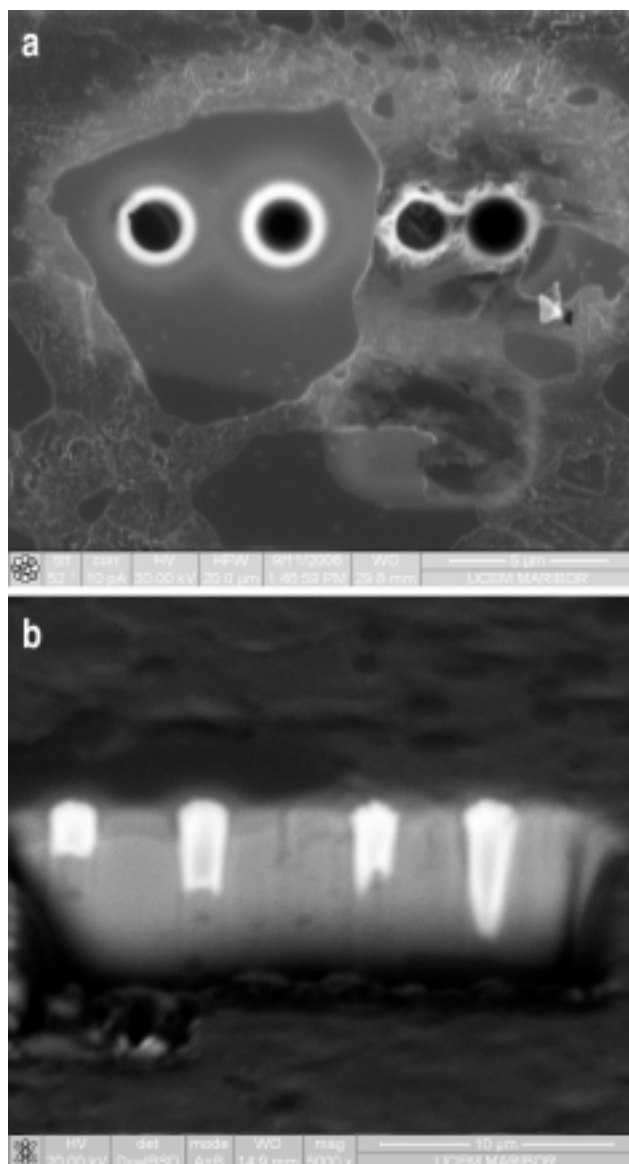
Pri mikroobdelavi s fokusiranim ionskim curkom odstranjujemo material na točno določenih mestih, da bi izdelali različne izvrtine v materialu, mikroorodja ipd. Prednost FIB-a je, da lahko izdelamo 3D-oblike, slabost proti drugim alternativnim metodam pa je počasnost, saj je hitrost odzemanja materiala majhna (red velikosti $1 \mu\text{m}^3/\text{min}$). Slika 5 prikazuje izvrtine v orodno jeklo, ki vsebuje karbide. V globljih luknjah je pereč problem redepozicija, ki jo lahko zmanjšamo z uporabo reaktivnih plinov.

4.2 Ionski mikroposnetki

Pri mikroskopiranju se moramo zavedati, da ionski curek pri vsakem prehodu raziskovane površine spreminja material in ustvarja artefakte (značilnosti, ki jih vzorec v resnici ni imel). Nastanek kontrasta s sekundarnimi elektroni ali sekundarnimi ioni, ki jih inducira ionski curek, je različen od tistega v elektronskem mikroskopu, zato nam dajejo mikroposnetki drugačne informacije. Na mikroposnetkih izvira kontrast iz:



Slika 4: Možne interakcije ionskega curka s trdnino



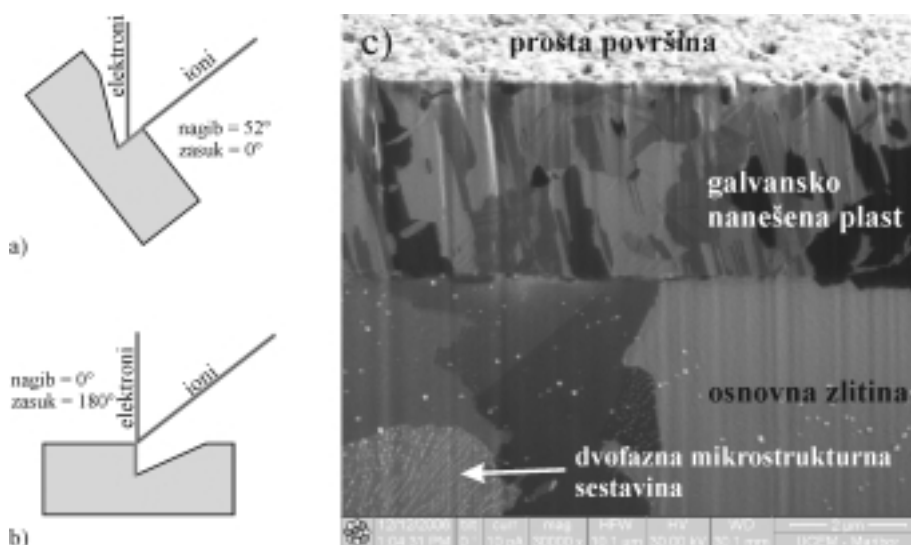
Slika 5: Izdelava lukenj v orodno jeklo, ki vsebuje karbide. Pogled od zgoraj z ioni, b) pogled od strani z elektroni po prečnem rezanju. Zaradi boljšega kontrasta so luknje napolnjene s platino.

- topografskih značilnosti (topografski kontrast)
- neenakih razpršitvenih koeficientov različnih faz (fazni kontrast) in
- razlik v kristalni orientaciji kristalnih zrn z enako kemično sestavo in kristalno zgradbo (orientacijski kontrast)

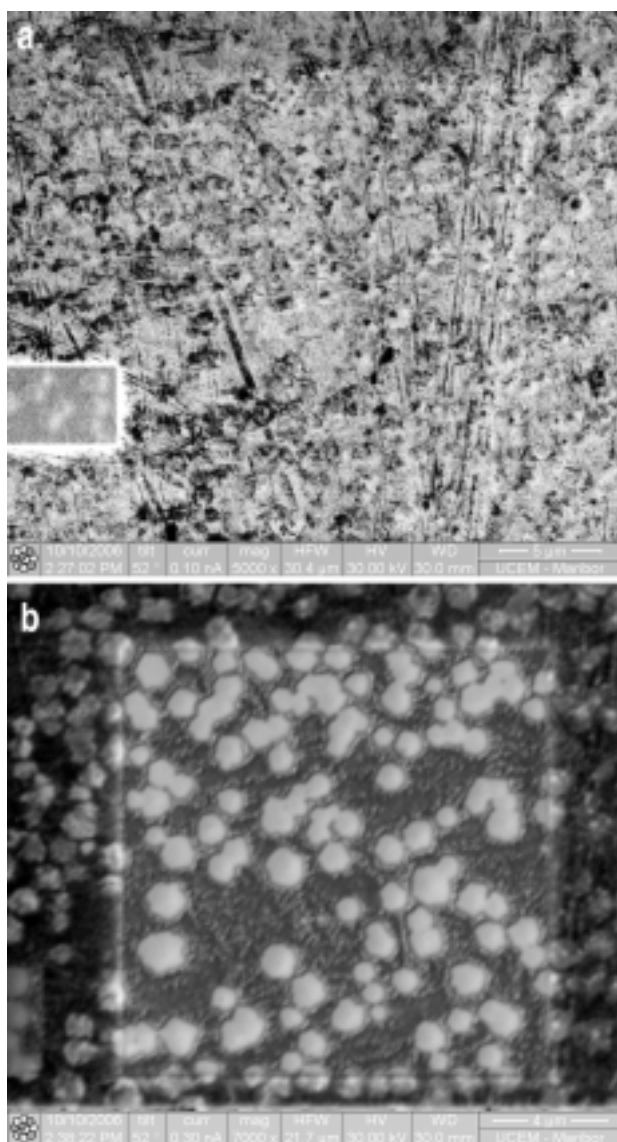
Na neravnih vzorcih nastane mnogo več sekundarnih elektronov na površinah, ki so bolj nagnjene glede na smer ionskega curka. V večfaznih materialih so svetlejša faze, ki imajo večji razpršitveni koeficient, medtem ko se v enofaznih polikristalnih gradivih pojavi kontrast zaradi razlike v orientaciji kristalnih zrn glede na smer ionskega curka – kanalski pojav. Zrna, pri katerih je smer ionskega curka vzporedna s smerjo z majhnimi Millerjevimi indeksi, so temnejša. Na sliki 6 c so vidni vsi naštetni kontrasti.

4.3 Prečni rezi (3D-mikroskopija)

Izredno močno orodje FIB-a je izdelava prečnih rezov. Z njimi odkrijemo površino materiala, ki je drugače skrit očem, saj je pod zunanjo ali metalografsko pripravljeno površino (slika 6 a). Ta metoda je zelo primerna za karakterizacijo napak, ki so na površini ali tik pod njo. Primerna je tudi za karakterizacijo mikrostrukture tik pod površino (primer so trakovi, nastali pri "melt spinningu" ali prahovi), ki jo z drugimi metodami težko ugotovimo. Pri nekaterih materialih je smiselno pred rezanjem zaščititi površino s prevleko iz platine. Slika 6 b prikazuje prevleko galvansko naneseno plast na osnovni zlitini. Kontrast v galvanski prevleki je orientacijski, saj se zelo dobro razločijo med seboj enakoosna kristalna zrna, ki vsebujejo številne dvojčične meje. V osnovni zlitini lahko razločimo različne faze zaradi ustreznega faznega kontrasta. Na prereznani površini lahko izvedemo tudi EDS-analizo. Opazen je tudi topografski kontrast,



Slika 6: Položaj vzorca pri prečnem rezanju (a) in pri opazovanju z ioni (b); dekorativna prevleka rodija na srebrovi zlitini (c)

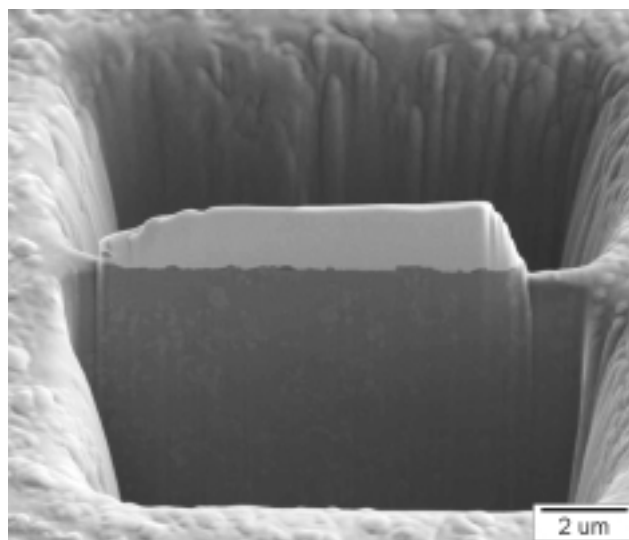


Slika 7: Prosta površina zlitine Al-Mn-Be, ulite v bakreno kokilo a) pred ionskim jedkanjem in b) po njem (tok 0,3 nA, napetost 30 kV, čas 10 min)

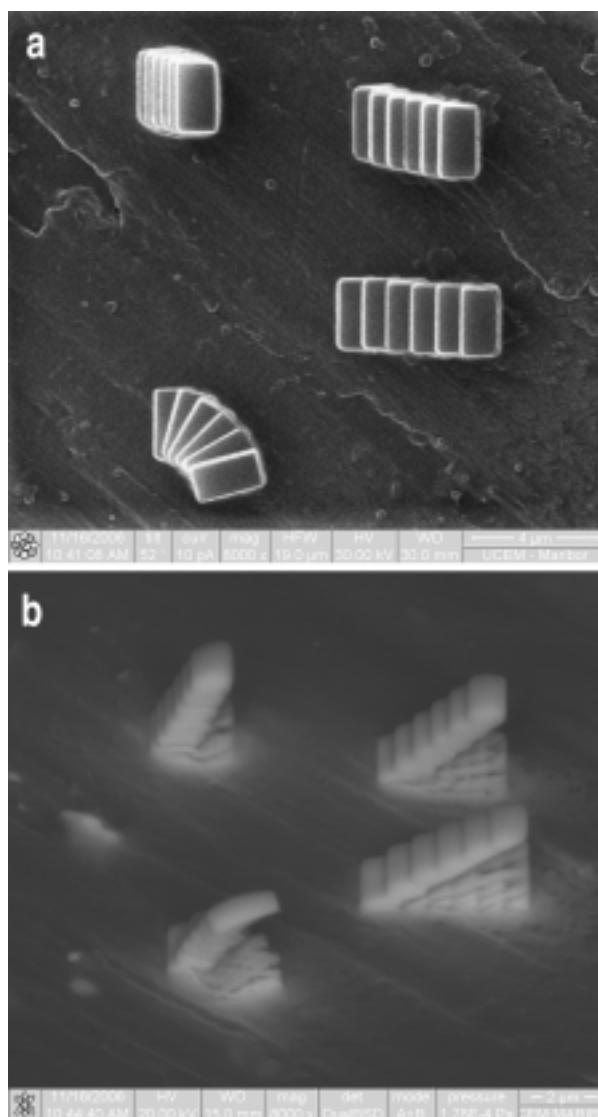
saj je zgornja (prosta) površina svetlejša kot površina prečnega reza.

4.4 Ionsko jedkanje

Pri pripravi kovinskih materialov navadno dobimo ustrezen kontrast s kemijskim jedkanjem, to je z nadzorovanim korozijskim napadom na določene mikrostrukturne sestavine. V nekaterih primerih so potrebna zelo agresivna jedkala, ki pogosto ne dajejo ponovljivih rezultatov ali se zadržijo v določenih špranjah in postopno uničujejo vzorec. V takih primerih lahko FIB uporabimo za postopno in nadzorovano odstranjevanje površinske plasti, da se odkrije mikrostruktura (slika 7). Za doseganje primerne kontrasta je navadno treba odstraniti le nekaj 10 nm debelo plast. Pri močnejšem odstranjevanju lahko



Slika 8: Priprava vzorca za TEM. Površina rezine je prekrita s Pt. Slika prikazuje stanje po dokončnem tanjšanju. Nato rezino pritrdimo na iglo mikromanipulatorja, izrežemo, pritrdimo na TEM-mrežico in ločimo od igle mikromanipulatorja.



Slika 9: Samostoječe mikrostoppice iz nanosa platine: a) navpični posnetek z ioni, b) stranski posnetek z elektroni

nastanejo na površini številni artefakti, ki otežijo interpretacijo mikroposnetkov.

4.5 Izdelava vzorcev za TEM

Ena izmed klasičnih vrst uporabe FIB je priprava vzorcev za TEM. Omogoča izdelavo zelo tankih vzorcev debeline pod 100 nm na točno določenem mestu. Postopek poteka v več stopnjah.

V prvi stopnji na vzorcu, ki je navadno brušen in poliran do stopnje, da se razločijo glavne mikrostrukturne sestavine, določimo mesto izreza in površino zaščitimo z nanosom platine. V drugi stopnji stopničasto odstranjujemo material na obeh straneh izreza s fokusiranim curkom galijevih ionov do globine okoli 5 μm (slika 8). Ker pri grobem odstranjevanju uporabljamo velike tokove ionskega curka (5–20 nA) in nastane neravna površina, je potrebno glajenje z manjšimi tokovi, dokler ne dosežemo želene debeline. V naslednjem koraku vzorec pritrdimo s Pt na tanko iglo manipulatorja in ga izrežemo. Nato vzorec pritrdimo na bakreno mrežico prav tako s Pt, medtem ko povezavo z iglo mikromanipulatorja prekinemo. Mrežico s pritrjenim vzorcem prenesemo v TEM. Če vzorec ni dovolj tanek, ga lahko še dodatno stanjšamo.

4.6 Izdelava 3D-objektov

Z nanašanjem predvsem ogljika iz fenantrena ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$) se lahko izdelajo najrazličnejši 3D-objekti, npr. vzmeti debeline 100 nm. Hitrost rasti ogljika je zelo velika, tudi do 10 $\mu\text{m}/\text{min}$, kar je bistveno več kot

pri drugih snoveh, ki jih nanašamo. Slika 9 prikazuje različne prostostoječe mikrometrške stopnice, narejene z nanašanjem Pt. Kompleksnejše oblike se lahko izdelajo s kombinacijo nanašanja plasti in mikroobdelave. Novejše naprave omogočajo izdelavo 3D-objektov na podlagi načrtov 3D-CAD.

5 SKLEP

Sodobni fokusirani ionski curek omogoča odvzemanje in nanašanje materiala na točno določenih mestih ter tudi mikroskopiranje. Večinoma se uporablja skupaj z vrstičnim elektronskim mikroskopom kot sistem z dvojnim elektronskim in ionskim curkom, katerega temeljna prednost je, da lahko z elektroni neposredno opazujemo delovanje fokusiranega ionskega curka. Čeprav se še vedno največ uporablja za popravilo elektronskih vezij, se njegova uporaba širi na najrazličnejša druga področja, kot so kovinski, keramični, polimerni in kompozitni materiali, geologija, umetnost, biologija, forenzika, če omenimo samo najpomembnejša.

6 LITERATURA

- ¹R. L. Selinger, J. W. Ward, V. Wang, R. L. Kubena, Appl. Phys. Lett. **34** (1979), 310
- ²J. Orloff, M. Utlant, L. Swanson: High Resolution Focused Ion Beams, FIB and Its Applications, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2003
- ³L. A. Giannuzzi, F. A. Stevie (urednika): Introduction to Focused Ion Beams; Instrumentation, Theory, Techniques and Practice, Springer-Science + Business Media LLC, 2005
- ⁴J. Ziegler, www.srim.org

OBDELAVA UMETNIH ŽIL S KISIKOVO PLAZMO

Ita Junkar¹, Nina Hauptman², Uroš Cvelbar¹, Janez Kovač¹, Miran Mozetič¹

¹Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

²Kemijski inštitut, Hajdrihova 19, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Politetrafluoroetilen (PTFE) je zaradi svojih mehanskih in kemijskih lastnosti primeren za uporabo v medicini, predvsem za izdelavo umetnih žil. Slabost umetnih žil iz PTFE-ja pa je nekompatibilnost površine s krvjo in s tem povezana tromboza ali strjevanje krvi. Za izboljšanje površinskih lastnosti umetnih žil so v uporabi različni postopki obdelave, predvsem zanimiv postopek je obdelava površine s plazmo. Obravnavali smo obdelavo umetnih žil PTFE s kisikovo plazmo, učinke obdelave smo opazovali z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) in mikroskopom na atomsko silo (AFM). Opazili smo, da s kisikovo plazmo spremenimo hrapavost površine. Iz meritev z mikroskopom na atomsko silo pa smo ugotovili, da spremenimo tudi površinske lastnosti.

Oxygen plasma modification of vascular grafts

ABSTRACT

Polytetrafluoroetilen (PTFE) is used as vascular graft material in medical applications because of its mechanical and chemical properties. The disadvantage of PTFE vascular grafts is their surface incompatibility with blood, which may induce thrombosis. There are a few surface modification techniques that are used to improve its surface properties, among them surface modification with plasma treatment. In this work we present surface modification of PTFE vascular grafts with oxygen plasma treatment. The effects of plasma modification were characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Atomic Force Microscopy (AFM). The results show that oxygen plasma treatment has modified artificial graft surface in a way that surface roughness has been altered. Force distance curves measured by atomic force microscopy show that surface properties have been altered as well.

1 UVOD

Polimer politetrafluoroetilen (PTFE) je primeren material za uporabo v medicini, saj združuje primerne mehanske in kemijske lastnosti, kot so dobra termična obstojnost, kemijska inertnost in nizek koeficient trenja ⁽¹⁾. PTFE se kot biomaterial uporablja predvsem za izdelavo umetnih žil. Slabost materiala PTFE za umetne žile je pojav tromboze med površino umetne žile in krvjo ⁽²⁾. Ker je PTFE kemijsko inerten material, mu moramo spremeniti površinske lastnosti tako, da bo uspešno vezal zaščitni nanos, ki bo preprečeval trombozo. Za spreminjanje površin so danes razširjene predvsem različne mokre kemijske tehnike, ki pa jih je zaradi hitrih reakcij težko kontrolirati. Na izboljšanje lastnosti umetnih žil lahko vplivamo z različnimi metodami obdelave površin in z uporabo nanosov iz različnih vrst proteinov, kot so gelatin ⁽³⁾, albumin ⁽⁴⁾ in kolagen ⁽⁵⁾. Na umetnih žilah iz PTFE-ja proces nanosa proteinov sestavlja odstranjevanje privlačnih funkcionalnih skupin, ki vsebujejo fluor, in vstavljanje zelenih skupin, kot so polarne funkcionalne skupine ⁽⁶⁾.

Najbolj obetavna metoda spreminjanja površine je obdelava materiala s plazmo. Ta tehnika postaja vse bolj zanimiva tudi za spreminjanje različnih vrst biomaterialov ⁽⁷⁾. S plazemsko obdelavo lahko vplivamo predvsem na površinske lastnosti materiala, kot so omočljivost, kemijska sestava, površinski naboj in hrapavost površine ⁽⁸⁾. Prav te lastnosti površine materialov so odločilne za uspešno spremembo površine in jih lahko dosežemo s plazemsko obdelavo pri primernih parametrih razelektritve, kot so tlak, vrsta plina, moč itd. S temi parametri vplivamo na plazemske parametre, kot so temperatura in gostota elektronov, gostota ionov, gostota atomov ipd. Material po obdelavi spremenimo zgolj na površini (nekaj nanometrov globoko), kar ne vpliva na mehanske lastnosti celotnega materiala ⁽⁹⁾. Ker so spremembe, ki jih naredimo s plazemsko obdelavo površine materialov, opazne na nanometrski skali, je temu primerno treba izbrati ustrezno metodo za določanje posledic plazemske obdelave. Za opazovanje topografije in površinskih sil, ki so nastale s plazemsko obdelavo umetnih žil, smo uporabili vrstični elektronski mikroskop (SEM) in mikroskop na atomsko silo (AFM).

2 EKSPERIMENTALNE METODE

2.1 Vzorec – umetne žile PTFE

Opazovali smo spremembe na umetnih žilah PTFE po obdelavi v kisikovi plazmi. PTFE je fluoropolimer, ki je širši javnosti poznan pod zaščiteno blagovno znamko Teflon. Za izdelovanje umetnih žil se uporablja tako imenovan razširjen teflon (ePTFE), ki ga izdelajo poroznega s posebnim postopkom ekspanziranja sintranih delcev teflona ter ga največkrat srečamo pod zaščitnim imenom Gore-Tex. Polimer ePTFE je primeren predvsem za uporabo v vaskularni kirurgiji zaradi svoje poroznosti, enostavnosti uporabe, enostavnosti pritrjevanja pri šivanju, zadovoljivega zdravljenja in zaradi primernih mehanskih in kemijskih lastnosti ⁽¹⁰⁾. Njegova slaba stran pa so trobogene reakcije, ki povzročijo strdke v žilah ⁽²⁾, zato je treba te vsadke zamenjati že po letu dni, kar pa zelo podraži zdravljenje.

2.2 Obdelava s kisikovo plazmo

Umetne žile iz ePTFE so bile obdelane neposredno v kisikovi plazmi pri tlaku 100 Pa. Plazmo smo

generirali v cevi iz borosilikatnega stekla dolžine 400 mm in premera 40 mm z radiofrekvenčnim generatorjem, ki je bil sklopljen s tuljavo s 14 ovoji. Vzorec smo postavili na sredino tuljave. Vzorci so bili izpostavljeni plazmi z gostoto elektronov $4 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$ in energijo 3 eV, gostota nevtralnih atomov pa je bila $6 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$. Časi obdelave so bili 1 min, 3 min in 10 min.

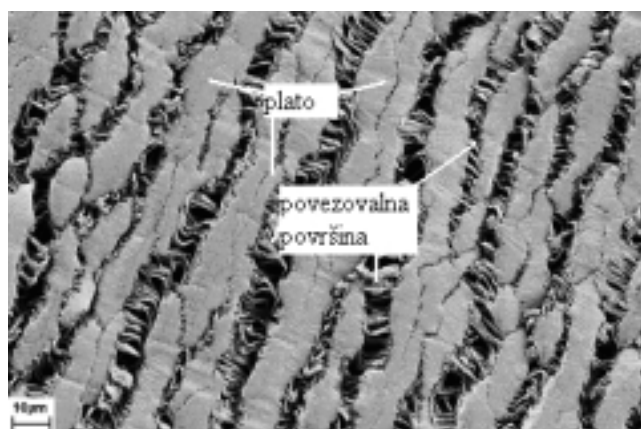
2.3 Vrstični elektronski mikroskop in mikroskop na atomsko silo

Za opazovanje površine umetnih žil smo uporabili SEM-mikroskop Zeiss Supra 35VP. SEM-slike so nam podale osnovne informacije o spremembah površine umetnih žil. Za snemanje tridimenzionalnih slik površine umetnih žil smo uporabili AFM-mikroskop, model Solver PRO, proizvajalca NT-MDT. Analiza površine je potekala v semikontaktnem načinu v zraku s konico iz silicijevega nitrida. Vzorce umetnih žil smo pripravili v tankih kosih (2 mm širine) in jih pritrdili na nosilce AFM-miskoskopa. Ker je struktura žil vlaknasta in nehomogena ter sestavljena iz platojev in povezovalnih površin (slika 1), smo AFM-slike lahko naredili le na področjih, manjših od $(5 \times 5) \mu\text{m}$, da smo se izognili vlaknastim predelom. Za opazovanje hrapavosti smo izbrali

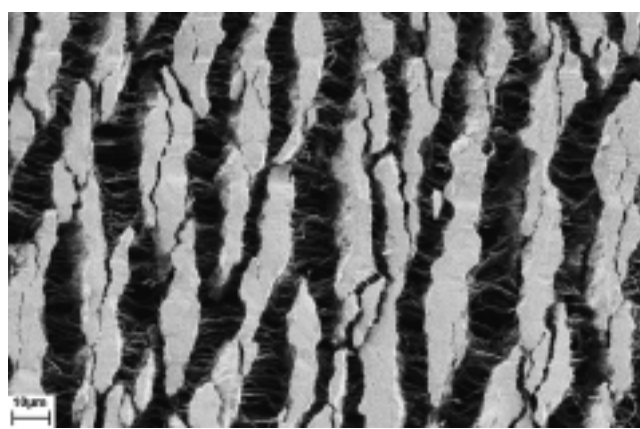
področja velikosti $(2 \times 2) \mu\text{m}$. Zaradi velike nehomogenosti je meritev hrapavosti na umetnih žilah predvsem informativna. Poleg topografije površine umetnih žil smo z AFM-mikroskopom izmerili sile v odvisnosti od razdalje med površino žile in AFM-konico. Te meritve nam dajejo informacijo o spremenjeni površinski napetosti in omočljivosti, ki je rezultat plazemske obdelave.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

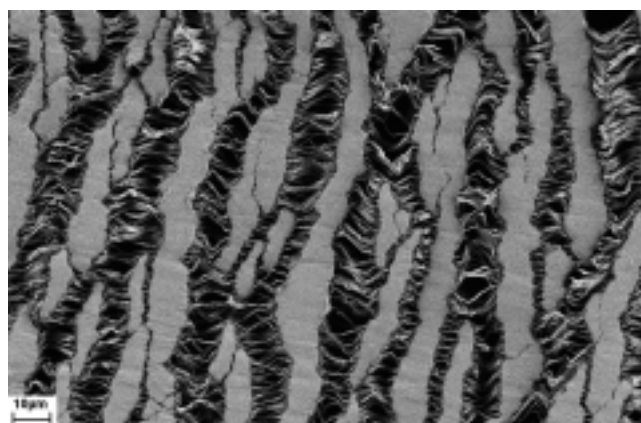
Plazemska obdelava umetnih žil povzroči površinske spremembe, ki jih opazimo tako s SEM-slik, kot tudi iz meritev na AFM-miskroskopu. SEM-slike prikazujejo, kako se s časom plazemske obdelave spreminja površina vzorca. Po daljšem času plazemske obdelave se povezovalna površina umakne v globino in posledično se platoji med seboj še bolj oddaljijo (slike 2–4). Razdalje med platoji se že po 1 min obdelave v kisikovi plazmi povečajo za nekaj mikrometrov. Po daljših časih obdelave se razdalje med platoji ne povečujejo več znatno, povezovalne niti pa se umaknejo nižje. S slike 4, ki prikazuje površino vzorca, obdelanega v kisikovi plazmi po 10 min, je razvidno, da povezovalnih površin in niti skoraj ni več opaziti.



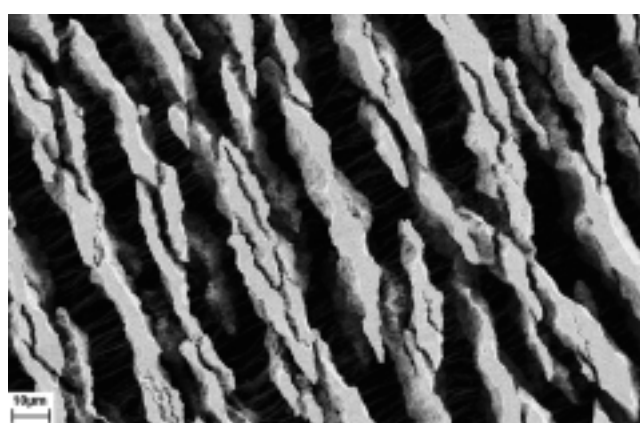
Slika 1: Neobdelan vzorec v kisikovi plazmi



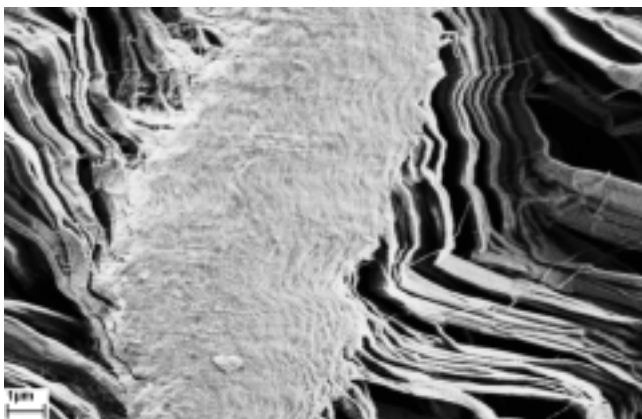
Slika 3: Obdelan vzorec 3 min v kisikovi plazmi



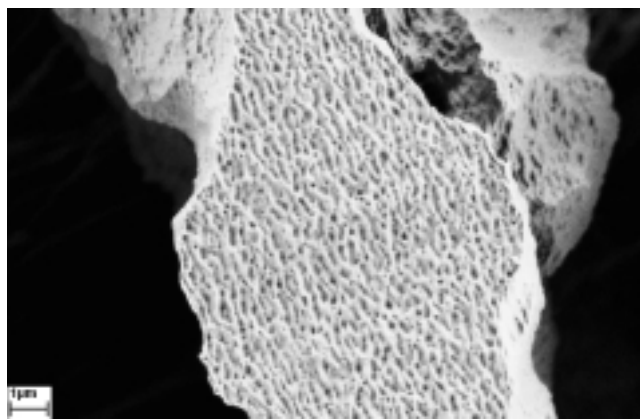
Slika 2: Obdelan vzorec 1 min v kisikovi plazmi



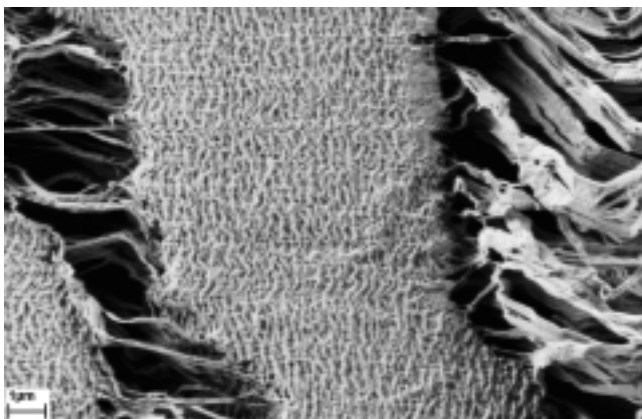
Slika 4: Obdelan vzorec 10 min v kisikovi plazmi



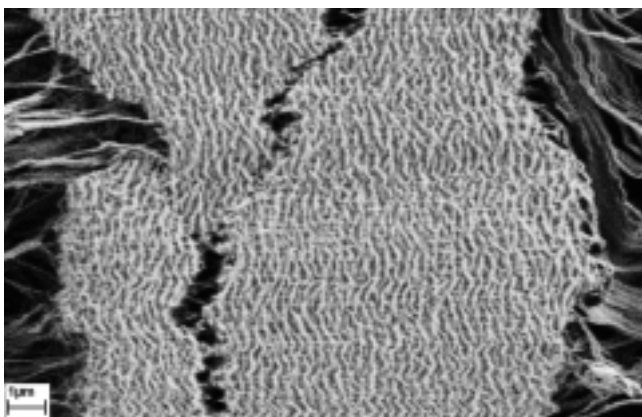
Slika 5: Neobdelan vzorec



Slika 8: Obdelan vzorec 10 min v kisikovi plazmi



Slika 6: Obdelan vzorec 1 min v kisikovi plazmi

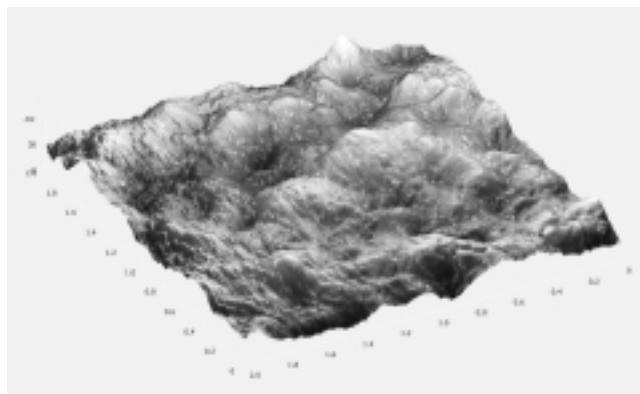


Slika 7: Obdelan vzorec 3 min v kisikovi plazmi

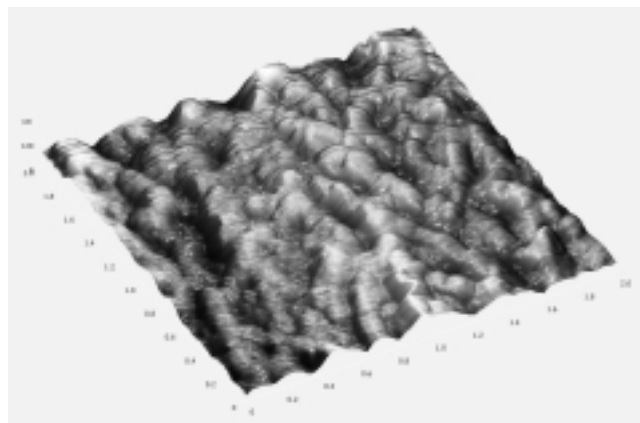
Spremembe zaradi plazemske obdelave lahko opazimo tudi na SEM-slikah platojev pri večjih povečavah (slike 5–8). Platoji po daljših časih obdelave postanejo vse bolj hrapavi (slike 6 in 7). Že po 1 min obdelave (slika 6) opazimo spremembe v hrapavosti površine vzorca. Po času obdelave 10 min (slika 8) pa so učinki plazme in jedkanja, ki ga povzročajo njeni radikali, že intenzivni in površina ni več tako hrapava. To ugotovitev potrdijo tudi slike, dobljene z AFM-mikroskopom (slike 9–12) na območju (2×2) μm . S teh slik je razvidno, da se hrapavost površine s časom

obdelave na intervalu 1 min in 3 min povečuje, po 10 min pa se nekoliko zmanjša.

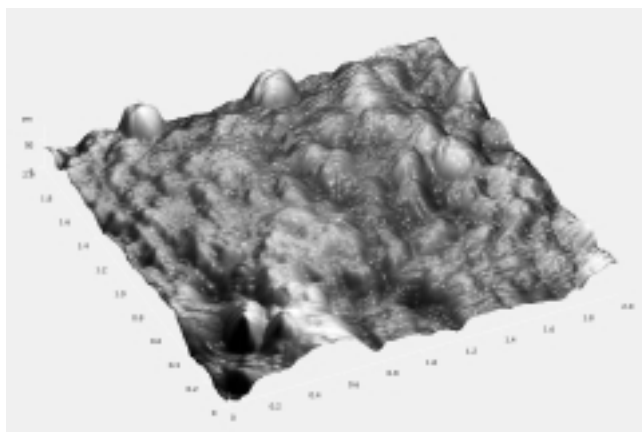
Značilni rezultati meritev sil v odvisnosti od razdalje so prikazani na sliki 13, ki prikazuje, kako se sile iz sprva odbojnih spremenijo v privlačne. Na neobdelanih vzorcih so sile med vzorcem in AFM-konico odbojne. Po 1-minutni obdelavi vzorca v kisikovi plazmi pa so sile med vzorcem in AFM konico privlačne, kar kaže na spremembo površinskih lastnosti. Tako obdelana površina umetnih žil je nato pripravljena za nadaljnji nanos proteinov, ki izboljšajo



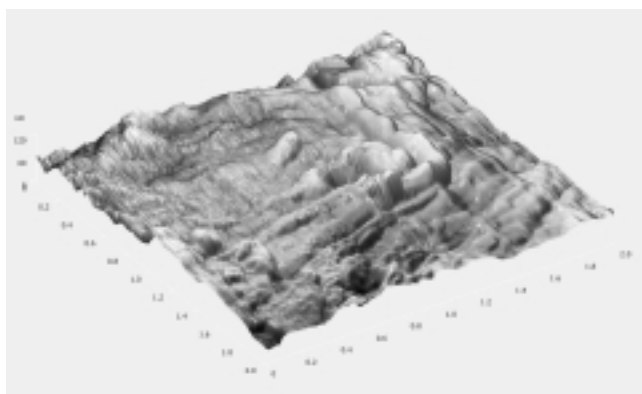
Slika 9: Neobdelan vzorec



Slika 10: Obdelan vzorec 1 min v kisikovi plazmi



Slika 11: Obdelan vzorec 3 min v kisikovi plazmi

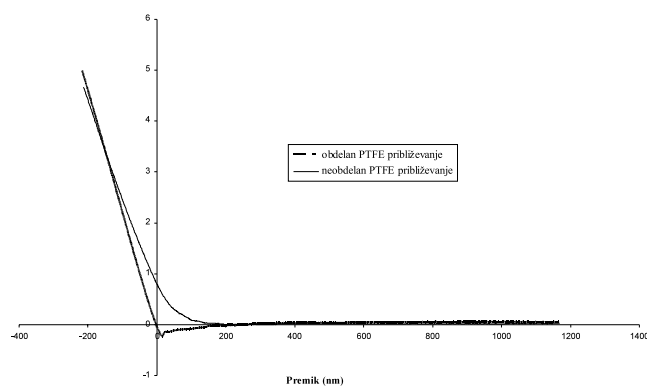


Slika 12: Obdelan vzorec 10 min v kisikovi plazmi

kompatibilnost površine s krvjo in preprečujejo sidranje krvnih celic in s tem povezanih skupkov in strdkov.

4 SKLEPI

Iz rezultatov meritev lahko sklepamo, da je kisikova plazma spremenila površino umetnih žil. Površina je pri času plazemske obdelave v področju 1–3 minute postala bolj hrapava in primerna za nanos proteinov, saj so se spremenile tudi površinske lastnosti. Sile, izmerjene med AFM-konico in vzorcem, so se že po krajšem času obdelave spremenile iz



Slika 13: Odklon žarka, odčitane na diodi, v odvisnosti od premika AFM-konice

odbojnih v privlačne. Plazemska obdelava umetnih žil je primerna metoda za povečanje hrapavosti površine, vendar pa je treba določiti primeren čas obdelave. Prednost plazemske obdelave je v tem, da omogoča spremembe površine in nima vpliva na mehanske lastnosti, ki jih želimo pri umetnih žilah ePTFE obdržati.

5 LITERATURA

- ¹P. K. Chua, J. Y. Chena,b, L. P. Wanga, N. Huangb Materials Science and Engineering R 36 (2002), 143–206
- ²M. J. Formichi, R. G. Guidoin, J. M. Jausseran, J. A. Awad, K. W. Johnston, M. W. King, R. Courbier, M. Marois, C. Rouleau, M. Batt, J. F. Girard, C. Gosselin, Ann. Vasc. Surg. 2 (1988)
- ³Drury JK, Ashton TR, Cunningham JD, Maini R, Pollock JG. Experimental and clinical experience with a gelatine impregnated Dacron prosthesis. Ann. Vasc. Surg. 5 (1987), 542–547
- ⁴Domurado D, Thomas D, Brown G. A new method for producing protein coatings. J Biomed Mater Res 9 (1975), 109–110
- ⁵Humphries AW, Hawk WA, Cuthbertson AM. Arterial prosthesis of collagen impregnated Dacron tube. Surgery 50 (1981), 947–954
- ⁶R. N. S. Sodhi, Application of surface analytical and modification techniques to biomaterials research, J. Electr. Spectrosc. Phenom. 81 (1996), 269
- ⁷J. C. Lin, S. L. Cooper, Biomaterials 16 (1995), 1017
- ⁸J. H. Lee, G. Khang, J. W. Lee, J. Colloid Interface Sci. 25 (1998), 323
- ⁹Terlingen, J.; Brenneisen, L.; Super, H.; Pijpers, A. P.; Hoffman, A.; Feijen, J. J. Biomat. Sci. Polymer 4 (1993), 165–181
- ¹⁰Lynch, W. Implants, Restructuring the Human Body. Van Nostrand Reinhold Company Inc. (1982), 73

INŽENIRING POVRŠINE IZDELKOV IN POLIZDELKOV IZ ALUMINIJEVIH ZLITIN

Varužan Kevorkijan

Impol, d. d., Partizanska 38, 2310 Slovenska Bistrica; ZRVK, Betnavska cesta 6, 2000 Maribor

IZVLEČEK

V delu opisujemo najnovejše razvojne dosežke na področju funkcionalnih prevlek za izdelke na osnovi aluminija s poudarkom na industrijskih postopkih izdelave prevlek.

Surface engineering of aluminum-based semi and finished products

ABSTRACT

The R&D novelties in the field of functional coatings for aluminium-based products are described, with particular emphasis on the industrial processes of coatings fabrication.

1 UVOD

Nanašanje prevlek na površino izdelkov je inženirski koncept, ki se je zadnje čase zelo uveljavil v vojaški industriji ter v tujih vojskah⁽¹⁾. Najbolj so v uporabi t. i. funkcionalne prevleke⁽²⁾, s katerimi načrtno in v točno določenem delu struktur in komponent, kjer je to potrebno za njihovo nemoteno obratovanje, ustvarjamo oz. spreminjamo določeno lastnost ali kombinacijo lastnosti. V večini primerov je to le površinska plast komponent, ki je v funkcionalnem stiku z okolico v vseh vojaških uporabniških okoljih. Takšno načrtno in lokalno ustvarjanje in spreminjanje potrebnih lastnosti podaljšuje trajnost struktur in komponent, razširja področje uporabe tradicionalnih in cenejših surovin in odločilno prispeva k zmanjšanju stroškov. Namesto da bi iz praviloma zelo dragih materialov, ki zagotavljajo predpisane funkcionalne lastnosti, izdelali ves izdelek, se vse bolj odločamo za to, da izdelek izdelamo iz cenejšega materiala in ga le prevlečemo z dražjim materialom. Takšen način je po drugi strani posledica vse bolj izpopolnjenih zahtev, ki jih od proizvajalcev v vojaški industriji zahteva sodobni trg. Zaradi tega je vse manj materialov, ki bi sami zadostili dolgemu seznamu zahtev. Rešitev je v izdelavi večplastnih prevlek, kjer posamezne plasti zagotavljajo oz. spreminjajo le eno ali kvečjemu le nekaj funkcionalnih lastnosti, skupaj pa ustvarijo željeno kombinacijo, in če je potrebno, tudi gradientno spreminjanje lastnosti⁽³⁾.

Inženiring površine se je uveljavil tudi v aluminij-ski industriji, kjer so prevleke zelo pomembno področje spreminjanja lastnosti polizdelkov in komponent iz Al-zlitin v bojnih, vadbenih in skladiščnih uporabniških okoljih. Najbolj razširjeni postopki nanašanja zaščitnih prevlek na izdelke iz aluminija so barvanje, lakiranje s prahom, galvanizacija in anodna oksidacija. Samo v Nemčiji uporabijo v civilne in vojaške

namene na leto več kot 1 milijon ton različnih polizdelkov iz aluminija, med katerimi je 80 % prevlečenih⁽⁴⁾. Številne polizdelke iz aluminija uporabljajo tudi v vojaški industriji, npr. zlitine visoke plastičnosti serije 1xxx, 5xxx in 6xxx (za dele opreme ter bojne glave raketnih in artilerijskih projektilov). Za izdelavo sredstev oborožitve, v lahkih oklepni borbenih sredstvih, pri proizvodnji streliva in različnih raketnih izstrelkih, lahkih prenosnih mostovih ter inženirski opremi in izdelavi vojaških čolnov se aluminijeve zlitine (serije 5xxx in 7xxx) uporabljajo v obliki tankih in debelih pločevin (platiniranih ter neplatiniranih), stiskanih in vlečenih profilov ter palic, odkovkov in ulitkov.

S prevlekami lahko načrtno spreminjamo številne lastnosti površine in s tem razširjamo področje uporabe polizdelkov in komponent iz aluminija. Najbolj pogosto spreminjamo mehanske lastnosti (trdota), tribološke lastnosti (obrabna obstojnost, hrapavost, mazalnost, koeficient trenja), električne lastnosti (električna prevodnost, električna upornost), termične lastnosti (toplotna prevodnost, odpornost proti temperaturnim šokom), optične lastnosti (barva, sijaj, odsevnost), korozijske lastnosti ter tudi obstojnost proti kemikalijam in oksidaciji in niz drugih posameznih lastnosti, kot so difuzivnost, poroznost, sposobnost prijetanja ipd.

Poroznost je zagotovo ena izmed pomembnejših lastnosti prevlek. Vse prevleke so v neki meri porozne. Stopnja poroznosti prevlek je odvisna od postopka, pogojev in njihove kemijske sestave in je od 1 % do 20 %⁽⁵⁾. Čeprav so s stališča uporabnikov navadno kakovostnejše manj porozne prevleke, so tudi izjeme. Prevleke, ki jih uporabljamo zato, da ustvarimo toplotno pregrado, morajo biti porozne, da slabše prevajajo toploto.

Z razvojem novih postopkov nanašanja prevlek na izdelke iz aluminija proizvajalci težijo k temu, da ustvarijo večplastne in večnamenske prevleke, ki omogočajo načrtno spreminjanje številnih lastnosti površine izdelka hkrati. Postopki so izpeljani tako, da omogočajo kontinuirno nanašanje različnih materialov, kot so keramika, kovina, polimeri in barve, ob minimalni pripravi površine podlage.

2 SODOBNI POSTOPKI NANAŠANJA PREVLEK

Večino sodobnih postopkov nanašanja prevlek na izdelke iz aluminija izvajamo tako, da fini prah ali

kapljice napršimo na podlago^(5,6). V obeh primerih je vhodna surovina fini prah, iz katerega izdelujemo prevleko. Ko gre za termično pršenje, prah z nosilnim plinom uvajamo v plamensko ali plazemsko pištolo, kjer se delci prahu, ko letijo proti tarči, spotoma stalijo, tako da na površino podlage priletijo kot posamezne kapljice, ki se zlivajo v prevleko⁽⁵⁾. Poleg temperature na kakovost dobljene prevleke odločilno vpliva tudi hitrost kapljic, ki je večinoma nadzvočna. Čeprav je v delu plamena, kjer pride do taljenja delcev prahu, temperatura nad tališčem aluminija, je v coni izločanja kapljic na podlagi pod njegovim tališčem (navadno manj kot 100 °C), zato ob nanašanju prevleke ne prihaja do lokalnega taljenja površine podlage.

Novejša tehnologija (nizkotemperaturno pršenje⁽⁶⁾), ki so jo sredi osemdesetih let razvili v nekdanji Sovjetski zvezi in jo nato l. 1994 prenesli v ZDA in Evropo, omogoča, da delce napršimo na podlago pri temperaturah, ki so veliko pod njihovim tališčem. Z nosilnim plinom, segretim do temperature največ 700 °C, se delci prahu, ki jih želimo naprševati, vnašajo v šobo za naprševanje, kjer se pospešujejo do nadzvočne hitrosti 2–4 Mach in s tolikšno hitrostjo zadevajo podlago.

Vmesna tehnologija (HVOF – pršenje s plamenom napol staljenih delcev pri velikih hitrostih^(5,7,8)), ki so jo razvili predvsem zato, da z njo nadomestijo kromiranje s šestvalenčnimi spojinami kroma, za katere so v ZDA ugotovili, da so kancerogene⁽⁹⁾, omogoča pršenje delcev na podlago s hitrostjo 400–1800 m/s. Temperatura podlage je največ 170 °C.

Druga, zelo obetavna razvojna smer je inženiring površine z laserjem^(10,11), ki so jo razvili leta 1998 v ZDA. Proces je sestavljen iz dveh proizvodnih operacij. V prvem delu procesa se pri sobni temperaturi z razpršilno pištolo nanese na podlago približno 150 µm debela plast prekursorja (keramični prah, zmešan z vodno raztopino organskega topila). V drugi fazi se z industrijskim laserjem (npr. Nd:YAG- ali CO₂-laser) stali površinska plast podlage. Keramični delci se zaradi svoje večje masne prostornine vtisnejo in/ali kemijsko povežejo s staljeno plastjo podlage in ustvarijo prevleko.

3 OPIS NEKATERIH POSTOPKOV IN PREVLEK

3.1 Prevleke za puše valjev motorja z notranjim izgorevanjem

Sodobna smer zmanjševanja mase vojaških transporterjev (zaradi zahtev po večji taktični in strateški mobilnosti, sposobnosti plavanja, zračnega transporta ter večje nosilnosti) zahteva od proizvajalcev različnih bojnih vozil in transporterjev vse

večjo uporabo aluminija za izdelavo ohišij, oklepnih kupol, koles in delov motorja.

Nadomeščanje litoželeznih puš valjev s pušami, izdelanimi iz aluminijevih zlitin, je možno le, če so te ustrezno prevlečene s prevleko, ki zagotavlja veliko obrabno obstojnost, nizek koeficient trenja, mazalnost in čim slabše prevaja toploto. Postopki, ki so sedaj v uporabi, so: galvansko kromanje ali termični postopki, kot so plazemsko in obločno naprševanje.

Novost na tem področju so prevleke iz tankih plasti, izdelane s prej opisanimi postopki naprševanja. Pri plazemskem nanašanju tankih plasti na podlago iz aluminijeve zlitine, zaprto v reakcijski posodi pod vakuumom, ioni ali molekule plazme odnašajo atome snovi, iz katere izdelujemo prevleko in jih prinašajo na površino podlage. Navadno je debelina prevleke le nekaj mikrometrov.

Postopek so v preteklosti uporabljali pretežno za nanašanje prevlek na zunanje oz. bolj dostopne površine izdelkov. Novost je posebej izoblikovana paličasta katoda, ki omogoča nanašanje prevlek tudi na manj dostopne oz. notranje površine izdelkov, kot so npr. puše valjev.

Po enem izmed že utečenih industrijskih postopkov prevlečejo pušo valja z večnamensko prevleko in valj nato vstavijo v izvrtino bloka motorja. Najnovejša tehnologija⁽⁴⁾, ki so jo razvili pri podjetju **Euromat GmbH**, omogoča, da vse to opravimo z eno samo proizvodno operacijo, tako da prevlečemo notranjo površino izvrtine valja, pri čemer kot reakcijsko posodo uporabimo kar samo izvrtino valja oziroma ohišje motorja.

3.2 Prevleke za ustvarjanje toplotne pregrade

Zgorevalna komora in deli motorja so pri obratovanju izpostavljeni precejšnjim termičnim obremenitvam, kar je posledica visoke (zaželeno je čim višje) delovne temperature in izmeničnih sprememb temperature. Zato bi bilo s stališča optimalnega izkoristka najboljše te dele izdelovati iz keramike, kar se v praksi ne obnese. Po drugi strani je uporaba monolitnih temperaturno obstojnih kovinskih materialov nezaželena zaradi njihove prevelike mase. Praktična rešitev tega problema je nanašanje keramične prevleke na notranjo površino zgorevalne komore in drugih delov motorja, narejenih iz aluminijevih zlitin. Zato da pri obratovanju temperatura sredice na osnovi aluminija ne bi preseгла kritične vrednosti, je treba s keramično prevleko, poleg veliko večje obrabne zdržljivosti, občutno zmanjšati prevajanje toplote.

Edini znan postopek, ki omogoča izdelavo takšnih keramičnih prevlek, je nanašanje prevleke s plazmo⁽⁴⁾. Značilnost tega postopka je, da se zaradi visoke

temperature plazme keramični delci stalijo, kar omogoča nastanek zelo gostih prevlek. Te so navadno iz ZrO_2 , stabiliziranega z Y_2O_3 .

Razlike v toplotni razteznosti kovinske podlage in keramične prevleke ublažimo z vmesno napršeno plastjo na osnovi $MCrAlY$ (M je lahko kobalt, nikelj ali železo). Vmesni sloj omogoča tudi boljšo obstojnost proti koroziji, ki jo povzročajo vroči zgorevalni plini.

V praksi prevlečemo s keramično prevleko le najbolj izpostavljene dele posameznih komponent (kot so npr. dovodni ventili, sprednja stran bata in glava valjev), saj bi termična pregrada po celotni površini avtomobilskega dela privedla do njegovega pregrevanja.

3.3 Prevleke za bate motorjev z notranjim zgorevanjem na osnovi aluminija

Večino obstoječih delov motorja zaščitijo z anodno oksidacijo in ponikljanjem. Osnovna slabost obeh postopkov je, da so te prevleke porozne. Poleg tega je v praksi dostikrat težko doseči enakomerno rast prevleke in je zato na posameznih delih izdelka prevleko potrebno naknadno brusiti.

V obeh primerih nastaja precejšnja količina izplakovalne vode, ki jo je treba kemijsko nevtralizirati, kar poleg okoljevarstvenih težav negativno vpliva na ceno končnega izdelka. Postopka sta tudi sicer precej draga, saj porabljata veliko količino električne energije, vode, olja in plinov.

Daljša trajnostna doba prevlek in okolju prijaznejša proizvodna tehnologija sta združeni v novem postopku pridobivanja $TiAlN$ -prevlek za avtomobilске bate na osnovi aluminija. $TiAlN$ -prevleko pridobivamo s postopkom termičnega naprševanja pri nižjih temperaturah (največ do $160\text{ }^{\circ}\text{C}$). $TiAlN$ -prevleka je dvakrat bolj trda kot prevleke, dobljene z anodno oksidacijo, in jo je mogoče enakomerno nanašati⁽⁴⁾.

3.4 Površinsko utrjene aluminijeve zlitine

Francosko podjetje **Almag** (del skupine **Morfa**) je vpeljalo v redno proizvodnjo nov proces utrjevanja površine polizdelkov in komponent iz aluminijevih zlitin⁽¹²⁾. Postopek omogoča, da na površini delov iz aluminijevih zlitin ustvarimo homogeno plast keramike.

Podobno kot pri zaščiti površine z anodno oksidacijo, del, ki ga želimo prevleči s keramično prevleko, potopimo v elektrolitsko kopel, ki je v tem primeru na osnovi SiO_2 , in skozi njo spustimo izmenični električni tok z napetostjo 800 V. Temperatura elektrolitske kopeli je $35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Površina izdelka se najprej prevleče s plastjo aluminijevega hidroksida, ki vsebuje številne nehomogenosti, kot so razpoke, jamice, vlakna in kratka, votla vlakna ("mikrocevke"). Plast iz aluminijevega hidroksida nato elektrolitsko reagira z SiO_2 tako, da v približno 40 min zraste do $60\text{ }\mu\text{m}$ debela keramična plast na osnovi mulitne keramike ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$).

Poročajo o izjemni oprijemljivosti dobljene keramične prevleke s podlago; obrabna odpornost je štirikrat večja v primerjavi s površino aluminija, utrjeno z anodno oksidacijo. Trdota dobljene keramične prevleke presega $HV\ 2300$ in je primerljiva s trdoto korunda. Žica iz aluminija s premerom 1 mm postane potem, ko jo v **Almagu** prevlečejo s $100\text{ }\mu\text{m}$ debelo plastjo mulitne keramike, enako toga kot 1 mm debela žica iz jekla.

Izdelki iz aluminija, obdelani z **Almagovim** postopkom, lahko dlje časa obratujejo pri povišani temperaturi do $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Keramična zaščitna plast ne prevaja električnega toka in zelo slabo prevaja toploto. Njena prebojna napetost je 20 kV/mm ; električna upornost keramične plasti debeline $100\text{ }\mu\text{m}$ presega $100\text{ }\Omega$. Poleg tega je dobljena keramična prevleka kemijsko obstojna proti kislinam, bazam in drugim agresivnim medijem, kot so morska voda in olja.

Potem ko z brušenjem in poliranjem odstranimo $15\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ debelo površinsko plast **Almagove** keramične prevleke, nastane površina iz mulitne keramike z izjemno majhnim koeficientom trenja. Trenje lahko še dodatno zmanjšamo tako, da prepojimo vmesni prostor med posameznimi kristali v prevleki s smolo ali s polimerom. Komponente iz aluminija, elektrolitsko prevlečene z **Almagovo** prevleko na osnovi mulitne keramike, uporabljajo za ležaje in tirnice, za dele krogličnih ležajev ali za drsne sisteme brez mazalnega sredstva.

3.5 Prevleke iz kvazikristaliničnih aluminijevih zlitin za kuhinjske posode

Kvazikristalinične aluminijeve zlitine so zbuja le v preteklosti pozornost zaradi svojih mikrostrukturnih značilnosti. Kasneje so raziskovalci ugotovili, da imajo te zlitine poleg izjemnih mehanskih in triboloških lastnosti še nadvse redko lastnost, da se na njih ne prijema praktično nobena snov. V laboratoriju za kovinske materiale francoskega raziskovalnega instituta **CNRS** so ustvarili **Cybernox** – kvazikristalinično aluminijevo zlitino proti prijemanju⁽¹²⁾. Zlitino so preizkusili za oblaganje kuhinjskih posod in ugotovili, da so plazemsko napršene prevleke iz **Cybernoxa** dovolj obstojne, da omogočajo nemoteno uporabo in pomivanje posode. **Cybernox**-prevleko izdelujejo s plazemskim naprševanjem tako, da kvazikristalinično zlitino v obliki finega prahu

vbrizgavajo z nosilnim plinom v plazemsko pištolo. Fini kvazikristalinični delci se stalijo, pištola naprši kapljice na podlago, kjer se te zlijejo v cca. 100 μm debelo plast.

Podjetje **SNMI**, lastnik multinacionalke **Saint-Gobain**, je odkupilo pravico uporabe vseh patentov v zvezi z zlitino Cybernox in proizvodnjo s Cybernoxom prevlečene kuhinjske posode. Industrijska proizvodnja poteka v podjetju **Sitram**, družinskem podjetju s 360 zaposlenimi, ki je odkupilo pravico proizvodnje prevlek na osnovi kvazikristaliničnih aluminijevih zlitin.

Po svojih lastnostih neprijemanja je Cybernox popolnoma primerljiv s teflonom. Cybernox ima tudi 2,5-krat večjo trdoto od nerjavečega jekla.

3.6 Luminiscenčne prevleke za aluminij

Emajliran aluminij združuje funkcionalne in estetske lastnosti stekla, kot so trdnost, kemijska obstojnost, visok sijaj in lep videz, s funkcionalnimi lastnostmi kovin (npr. s trdnostjo).

Začetki emajliranja aluminija segajo v petdeseta leta, ko so kot eno izmed glavnih sestavin za pridobivanje emajlov uporabljali spojine svinca. Sodobni emajli ne vsebujejo svinca. Emajliranje izdelkov iz aluminija je posebej priljubljeno v ZDA, kjer, med drugim, vgrajujejo velike količine emajliranega aluminija v vojaške ladje, kot sta npr. letalono silki Forrester in Saratoga.

Novost so fosforescenčni emajli⁽¹²⁾, ki jih izdelujejo z dodatki svetlečih pigmentov. Ti so toplotno obstojni do 600 °C, nato pa se pri višjih temperaturah razgrajujejo. Takšni emajli niso primerni za jeklene dele, ki jih emajliramo pri 830 °C, ampak jih lahko uporabimo le za emajliranje izdelkov na osnovi aluminija, ki jih emajliramo pri nižji temperaturi (cca. 550 °C).

Fosforescenčne emajle za aluminij izdelujejo v rumeno-zeleni, modri in modro-zeleni barvi.

Vzporedno s fosforescenčnimi emajli izdelujejo tudi fluorescenčne emajle⁽¹²⁾. Ti emajli, ki so popolnoma nevnetljivi, nestrupeni in ne sevajo, oddajajo svetlobo, ko so izpostavljeni nevidni svetlobi kratke valovne dolžine, ki presega valovno dolžino UV svetlobe (t. i. "črna svetloba"). Barve nastajajo v popolni temi zaradi "osvetljenosti" predmeta s "črno svetlobo" in zbujajo pozornost zaradi svoje intenzivnosti. Fosforescenčne emajle uporabljajo za vojaške oznake, ki morajo ostati vidne tudi v popolni temi.

3.7 Prevleka "topocrom" za večjo obrabno zdržljivost

"Topocrom" je prevleka na osnovi kroma, ki jo ustvarimo s posebnim postopkom elektrolitskega nanašanja kovin na podlago⁽¹²⁾.

Površina topocroma je prekrita s ploskimi delci, katerih velikost in porazdelitev reguliramo z načrtnim spreminjanjem fizikalnih parametrov procesa galvanizacije. Tako lahko načrtno spreminjamo hrapavost in topografijo površine prevleke.

Pri **WMV** so v sodelovanju z **IPA, Stuttgart** (članom **Fraunhofer Association**), razvili nov postopek galvanizacije, ki omogoča pridobivanje prevlek z zelo majhnimi dimenzijskimi tolerancami. Večplastnosti prevleke po novem ne dosežemo tako, da prenašamo komponente iz kopeli v kopel, temveč se kemijske spremembe na površini komponente odvijajo v eni sami kopeli, neposredno ena za drugo⁽¹²⁾.

Večplastna struktura prevleke topocrom, s posebej izdelano trdo površinsko plastjo, omogoča izjemno obrabno zdržljivost in obstojnost proti mehanskim poškodbam⁽¹²⁾.

Topocrom so preizkusili v različne namene (npr. za zaščito ležajev in batnih vodil za dele motorja z notranjim zgorevanjem). Izkazalo se je, da je topocrom veliko bolj obstojen v primerjavi z drugimi prevlekami, dobljenimi z navadnimi postopki galvanizacije⁽¹²⁾.

3.8 PROTAL – Priprava površine in ustvarjanje prevleke v eni sami proizvodni operaciji

"Protal" je proces, ki so ga l. 1998 razvili v podjetju **Sulzer Metco**⁽¹²⁾. Omenjena tehnologija omogoča razmastitev in aktiviranje površine ter izdelavo prevleke v eni sami proizvodni operaciji. Razmastitev in aktiviranje površine potekata tako, da z industrijskim laserjem izhlapiamo maščobo in razgradimo plast oksida.

Vendar je znano, da se plast oksida na podlagi iz aluminija zelo hitro obnavlja ter zmanjšuje prijemanje prevleke na površino izdelka. Ta problem so v **Sulzer Metco** rešili tako, da so na robotsko roko poleg laserja za razmastitev in aktiviranje površine montirali še plazemsko pištolo, s katero napršijo prevleko. Prevleko nanesejo takoj po končani razmastitvi in aktiviranju površine, kar izključuje možnost vmesne oksidacije.

"Protal" je okolju prijazen postopek, ki porablja malo energije. Ker razmastitev, aktiviranje površine in izdelava prevleke potekajo v nizu, prihranimo čas. Prijemanje prevleke na površino podlage iz aluminija ali titana je enako, kot da bi površino podlage peskali s korundnimi kroglicami.

4 MOŽNOSTI RAZVOJA ZAŠČITNIH PREVLEK V IMPOL, d. d.

Inženiring površine polizdelkov in komponent iz aluminija za vojaško industrijo je razvojna pro-

blematika, s katero se Impol, d. d., želi sistematično ukvarjati, zlasti v sodelovanju s končnimi uporabniki – domačo ter Natovo vojaško industrijo in proizvajalci prevlek (IJS, Center za trde prevleke). Delež aluminija in drugih lahkih kovin (npr. magnezija) v vojaški opremi bo v prihodnje možno povečevati le ob nadomeščanju funkcionalno vse bolj zahtevnih delov, ki jih vojaška industrija zaenkrat proizvaja iz jekla, litega železa in podobnih tradicionalnih materialov. Nezadostne mehanske, tribološke in termične lastnosti aluminijevih in še posebej magnezijevih zlitin omejujejo nadaljnje nadomeščanje jeklenih oz. lito-železnih delov z deli iz lahkih kovin. Zato bo treba med drugim razviti večplastne kompozitne materiale s sredico iz lahke kovine in večslojno površinsko plastjo, sestavljeno iz posebnih inženirskih materialov. Razvoj takšnih materialov in njihova nadaljnja predelava v polizdelke in končne izdelke je zagotovo del prihodnosti aluminijske industrije.

Impol je ta svoj interes že izkazal ob sofinanciranju raziskav sinteze zelo trdih (do 42 GPa!) kompozitov $\text{AlMgB}_{14}\text{-TiB}_2$ (aplikativni projekt; nosilec ZRVK, sodelujoči organizaciji IJS, Impol), ki jih je možno plazemsko naprševati na podlago iz Al-zlitin. Tovrstne prevleke, ki imajo poleg izjemne trdote tudi

zelo nizek koeficient trenja (in jih zaradi teh koristnih lastnosti ameriška vojska intenzivno preučuje), bi po našem mnenju poleg tradicionalnih, katerih površinsko aplikacijo bi bilo treba implicirati na Impolovih polizdelkih, zanimivih za vojaško industrijo, lahko domači vojaški industriji zagotovil pomembno primerjalno prednost (npr. v programih protidobav).

LITERATURA

- ¹N. B. Dahotre, S. Seal, JOM, 53 (2001) 9, 43
- ²R. Y. C. Tsui, Comprehensive composite materials, Volume 3, Metal matrix composites, 1st ed., Elsevier 2000, p. 247
- ³A. L. Greer, Comprehensive composite materials, Volume 3, Metal matrix composites, 1st ed., Elsevier 2000, p. 321
- ⁴B. Schmidt, M. Feldhege, I. J. Rass, Aluminium, 75 (1999) 4, 290
- ⁵F. M. J. van der Berge, Advanced materials & processes, 154 (1998) 12, 31
- ⁶A. Papyrin, Advanced materials & processes, 159 (2001) 9, 49
- ⁷B. D. Sartwell, P. E. Bretz, Advanced materials & processes, 156 (1999) 2, 25
- ⁸D. Moore, Advanced materials & processes, 155 (1999) 14, 31
- ⁹D. Duclos, Advanced materials & processes, 159 (2001) 2, 49
- ¹⁰A. Agarwal, N. B. Dahotre, Advanced materials & processes, 157 (2000) 4, 43
- ¹¹N. B. Dahotre, S. Nayak, O. O. Popoola, JOM, 53 (2001) 9, 44
- ¹²Aluminium, 77 (2001) 4, 166

PETERLINOV PRISPEVEK K RAZVOJU VAKUUMSKIH TEHNIK

Stanislav Južnič

Inštitut za matematiko, fiziko in mehaniko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Jeseni 2008 bo minilo 70 let od doktorata Antona Peterlina in sto let od njegovega rojstva. Več njegovih sorodnikov je pisalo o znanosti in vakuumu, najstarejši med njimi pa je bil ded njegove žene Maks Samec.

Kot mlad asistent je Peterlin uporabljal vakuumske tehnike pri meritvah sipanja rentgenskih žarkov v tekočinah, po svojem medvojnem obisku v Dresdnu pa predvsem pri sipanju na makromolekulah. Med desetletnim vodenjem Fizikalnega inštituta, ki ga je preimenoval po Jožefu Stefanu, je vpeljal sodobne vakuumske tehnike v ljubljansko jedrsko fiziko in s tem postavil trden temelj za naše današnje delo. V četrtni stoletja pedagoškega dela na ljubljanski univerzi (1933–31. 8. 1960) je prehodil pot od asistenta do rednega profesorja in vzgojil prvo povojno generacijo naših strokovnjakov. Desetletje jim je predaval eksperimentalno fiziko in vodil praktikum s poudarkom na vakuumskih tehnikah.

Peterlin's Contribution to the Development of Vacuum Technique

ABSTRACT

In autumn 2008 the 70th anniversary of Peterlin's doctoral dissertation and centenary of his birth will be celebrated. Many of his family members published about science and vacuum, among them his wife's grandfather Maks Samec.

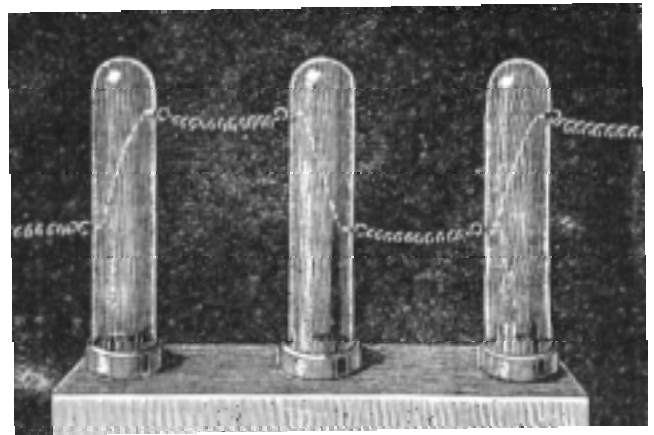
As a young assistant at the University of Ljubljana Peterlin used early vacuum techniques for X-ray scattering measurement on liquids. His wartime work in Dresden brought him increasingly in contact with macromolecules which became his main area of research. During his decade-long leadership of Ljubljana Physics Institute, in the meantime named after Jožef Stefan, Peterlin introduced modern vacuum techniques in nuclear and solid state physics, thereby laying a solid foundation for our present day achievements. Within the quarter century at the University of Ljubljana (1933–August 31, 1960), first as assistant and later as a full professor, Peterlin educated the whole post-war generation of Slovenian scientists, physicists as well as mathematicians. For over a decade he not only taught experimental physics but also designed and supervised laboratory experiments for students using vacuum techniques.

1 UVOD

Preglednica 1: Štiri generacije Peterlinovih doktorandov (Prvi datum je odtisnjen na disertaciji, drugi je datum obrambe, tretji promocije)

Anton Peterlin 1938
 Ivan Kuščer 1950 / 1. 7. 1950/5. 4. 1952
 Peter Gosar 1955 / 17.12.1955 / 28.9.1956
 Igor Vilfan 1975
 Peter Prelovšek 1975
 Anton Ramšak 1990
 Tomaž Rejec 2003
 Janez Jaklič 1996
 Aleš Zupan 1996
 Dean Cvetko 1996
 Darko Veberič 2001
 Tomaž Kranjc 1985
 Darko Jamnik 1959 / 28.3. / 14.6.1960
 Uroš Miklavžič 1965 / 28. 12. 1965 / 14. 1. 1966

Gabrijel Kernel 1965 / 28. 12. 1965 / 14. 1. 1966
 Aleš Stanovnik 1980
 Marko Starič 1992
 Dejan Žontar 1998
 Robert Jeraj 1999
 Franci Sever 1984
 Peter Križan 1987
 Damijan Škrk 1999
 Rok Pestotnik 2001
 Andrej Gorišek 2003
 Mark Pleško 1987
 Danilo Zavrtanik 1988
 Andrej Filipčič 1995
 Boštjan Golob 1996
 Igor Mandić 1997
 Samo Stanič 1999
 Borut Eržen 1999
 Marko Mikuž 1988
 Matevž Tadi 2001
 Bojan Boštjančič 1990
 Ervin Križnič 1993
 Tomi Živko 1994
 Tomaž Podobnik 1995
 Gordana Medin 1997
 Borut P. Kerševan 2000
 Marko Bračko 2001
 Raša Pirc 1968
 Dušan Brajnik 1974
 Matjaž Korun 1981
 Rudolf Kladnik 1962 / 23. 3. / 12. 6. 1963
 Sergej Pahor 1963 / 4. 6. 1963 / 9.6.1964
 Tomaž Kalin 1978
 Janez Ferbar 1986
 Milan Čopič 1955 / 5.2.1955 / 10.3.1955
 Gvido Pregl 1968
 Matjaž Ravnik na mariborski Tehniki
 Matjaž Božič 2004
 Samo Korpar 1997
 Marko Mavčec 1999
 Mateja Peršič 1999
 Črt Zupančič 1955 / 27. 3. 1956 / 10. 3. 1959
 Bogdan Povh 1960 / 22. 12. 1960 / 28. 2. 1961
 Peter Kump 1971
 Janez Dekleva 1955 / 29.3. / 14.7.1956
 Anton Moljk 1956 / 21.3. / 20. 4. 1957
 Jože Pahor 1961 / 14. 10. / 22.11. / 1961
 Alojz Kodre 1973
 Iztok Arčon 1992
 Jana Padežnik Gomilšek 1998
 Rok Prešeren 2000
 Matej Komelj 2000
 Danica Burg Hanžel 1973
 Ferdinand Grešovnik 1973
 Marjan Hribar 1974
 Artur Mulheisen 1996
 Matjaž Štuhec 1996
 Miodrag V. Mihailović 1958 / 16.2.1959 / 10.3.1959
 Mitja Rosina 1964 / 29. 12. 1964 / 26. 2. 1965



da eterja ni, ampak da je to, kar se je doslé imenovalo eter, tudi navaden zrak, ki napolnjuje, se vé da, jako redek, vse svetske prostore."

Seveda se je Samec zavedal tudi pomembnosti vakuuma pri poskusih:² "... Ako tedaj iskro s spektroskopom opazujemo, ne vidimo samo spektrov kovine, ampak tudi spektra vsake posamezne sestavine zraka; mi vidimo na primer spektrum vodoroda, kisloroda, solitoroda. Ako pa hočemo dobiti čist spektrum, to je spektrum kovine same, moramo ta eksperiment napraviti v brezračnem prostoru."

V Samčevi razpravi zasledimo celo citate povsem sodobnih razprav, na primer objav iz leta 1868 (Ångström, Zöllner). Glede na kratko zakasnitev Samčevega pisanja za objavami nemških raziskovalcev je gotovo prebiral nemško strokovno literaturo, najverjetneje kar Poggendorffove *Annalen der Physik und Chemie*.

Samec je leta 1876 objavil razpravo o možganih z odmevi Darwinove teorije.³ Prevajal je Somatologijo Jana Nepomuka Woldřicha, vendar je Matica pri slednji dvomila ob uspešnem natisu in prodaji zaradi Samčevega nepoznanja šolskih razmer. Tako je prevod dokončal goriški profesor leposlovec Fran Erjavec in so ga natisnili pod njegovim imenom.⁴ Samec je v svojih spisih pogosto uporabljal rusko literaturo, še posebno v Črtici o vplivu podnebja (1871), prevedel pa je celo Turgenjev roman Dim v slovenščino.⁵

Samec je bil naprednih nazorov: nasprotoval je uporabi steznikov v ženski garderobi, na vrtu svoje hiše pa je postavil telovadno orodje za svoje otroke. Obiskal je 3. mednarodno električno razstavo na Dunaju, ki jo je po tehniški in znanstveni plati od 11. 8. 1883 vodil Jožef Stefan.⁶ Na Kamniški Bistrici je kot župan (1880–1886) in od leta 1883 deželni poslanec za okraje Radovljica, Tržič in Kamnik hotel postaviti jez ter elektrarno za potrebe Kamnika; žal je projekt prekinila prezgodnja smrt. Njegov sin kemik Maks je pozneje postal častni meščan Kamnika. Oba sta pokopana v Kamniku.

Sin Maksa Samca, Maks Samec mlajši, je študiral kemijo na Dunaju v času, ko je tam še lahko slišal predavati slovitega Boltzmann. Že kot dvajsetletnik je leta 1905 pri Dunajski akademiji objavil 50 strani dolgo razpravo o meteorologiji in prozornosti zraka v različnih vremenskih razmerah. Na koncu se je za

pomoč zahvalil dvornemu svetniku Hansu Pernterju. Mladi Samec je leta 1922 sodeloval pri ustanovitvi Koloidnega društva, ki ga je nagradilo poldrugo desetletje pozneje. Objavljal je v *Kolloidzeitschrift*, ki so ga izdajali od leta 1906.

Maks Samec mlajši je bil med letoma 1935 in 1937 rektor ljubljanske univerze.⁷ Dne 16. 5. 1940 je bil izvoljen za rednega člana Akademije znanosti in umetnosti, 6. 6. 1940 pa je predsednik razglasil njegovo izvolitev. 16. 12. 1940 je Samec natipkal na list polovičnega A4-formata, da se odpoveduje članstvu v akademiji, ker profesorja Plemlja "faktično ovira njegova navzočnost na sodelovanju" pri sejah matematično-prirodoslovnega razreda. 4. 1. 1941 je predsednik Samčev odstop vzel na znanje, 1. 2. 1941 pa je enako storil še načelnik. Dne 6. 12. 1949 je bil Samec kot upravnik Kemijskega inštituta v Ljubljani sprejet za rednega člana Slovenske akademije v razredu za matematične, tehniške in fizikalne vede.⁸

Poleti 1945 je bila Maksu Samcu odvzeta profesura v Ljubljani zavoljo domnevne kršitve kulturnega molka, saj je med vojno svoje izsledke objavljajl v nemških znanstvenih revijah. Samčev nasprotnik je bil ljubljanski profesor za anorgansko kemijo; ni smel več delati niti v laboratoriju, ki ga je leta 1919 sam ustanovil v kletnih prostorih realke na Vegovi ulici, temveč le v zasilnih laboratorijih stavbe današnjega NUK-a. Boris Kidrič je že kot študent poznal Samčevo delo na področju škroba in koloidov, zato ga je zaščitil, tako da je kljub izgubi profesure še naprej dobival plačo. Samčeva žena se je kot Dunajčanka morala izseliti, Kidričeva naklonjenost pa je probleme zgladila vsaj za Samca.⁹ Dne 1. 10. 1946 je Samec postal upravnik Kemijskega inštituta pri SAZU v Ljubljani, ki je sprva sicer obstajal le na papirju. Dne 6. 12. 2006 so prvič podelili Samčeve nagrade za uspešne študente kemije v Sloveniji.

Maks Samec mlajši je leta 1938 prejel nagrado Laura R. Leonard od *Kolloidgesellschaft*, ki je bila ustanovljena leta 1922. Dne 27. 9. 1938 je dobil spominsko medaljo univerze v Nancyju. Dobil je tudi August Wilhelm von Hofmannovo odlikovanje Nemškega kemijskega društva (4. 5. 1940), medaljo *Arbeitsgemeinschafts-Getreideforschung E. V. Detmold*, ponovno doktorsko diplomo Dunajske univerze in več francoskih nagrad, med njimi l' *Ordre du Mérite*

¹ Samec, 1871, 259.

² Samec, 1871, 268.

³ Bernik, 1964, 16.

⁴ Bufon, 1964, 370–372.

⁵ Smerdu, 1964, 382.

⁶ Članek ob 50-letnici smrti, Jutro, 20. 8. 1939; sporočilo Tanje Peterlin-Neumaier 17. 12. 2006.

⁷ Peterlin-Neumaier, 2004, 46.

⁸ Letopis Akademije znanosti in umetnosti. 1938–1942 (1943) 1: 296, 298, 308, 332; Letopis Slovenske Akademije znanosti in umetnosti, 1948–1949 (1950) 3: 65; Ohranjeni Samčev tipkopis na listu polovičnega A4-formata, Knjižnica SAZU.

⁹ Osredkar, Polenec, 2000, 22.

pour la Recherche et l'Invention (Grand Officier). Dne 31. 12. 1949 je prejel nagrado Zvezne planske komisije, Prešernovo nagrado pa za leto 1950.

Maks Samec starejši se je poročil s hčerjo kamniškega posestnika in gostilničarja Jožefa Rodeta iz Rodice 9, kjer je bil pozneje rojen kardinal Franc Rode. Terezija Rode in Maks Samec sta imela tri otroke, katerih potomci so pomembni glasbeniki in znanstveniki. Samčeva vnukinja matematičarka Leopoldina (Oli) Leskovic se je poročila s fizikom Peterlinom, sinom Antona Peterlina iz Šiške in Zofije Pučnik iz Kranja.

Maks Samec mlajši je bil stric soproge fizika Antona Peterlina. Od konca 1940-ih let dalje sta Samec mlajši in Peterlin družno vodila oba najpomembnejša fizikalna in kemijska inštituta v Ljubljani.

3 MLADI PETERLIN EKSPERIMENTIRA IN PREDAVA O VAKUUMSKIH TEHNIKAH

Anton Peterlin je bil najpomembnejši sodobni ljubljanski fizik. Njegova vloga bi bila gotovo v marsičem primerljiva z uspehi matematika Plemlja, če mu ne bi v vzponu moči pota prekrizala politika.

Peterlinov oče Anton je študiral pri Jožefu Stefanu na Dunaju in je ob koncu študija filozofije leta 1888/89 prejemal prestižno Knafljevo štipendijo s stanovanjem v Knafljevem dunajskem domu. Postal je profesor fizike in matematike na Poljanski gimnaziji v Ljubljani. Predelal je aritmetiko Blaža Mateka za nižje šole po novem učnem načrtu, Jakob Zupančič pa je predelal Matekove knjige za višje razrede srednji šol (1910).¹⁰

Anton Peterlin mlajši je imel starejšo polsestro Sonjo, rojeno Guzelj, poročeno Remec, na Lancovem v Radovljici in na IJS mlajšo sestro Marjo, poročeno Lapajne. Anton ni bil zadovoljen s svojimi gimnazijskimi profesorji fizikalnih ved, zato je iskal pomoči pri univerzitetnem profesorju biologije Pavlu Grošlju, predvsem pa pri svojem stricu dr. Simonu Dolarju, profesorju matematike, fizike in filozofije na gimnaziji v Kranju. Simon Dolar se je poročil z Zofijino mlajšo sestro Mihaelo (Helo) Pučnik. Njun sin Daro Dolar (* 1921; † 2006) je kot profesor fizikalne kemije na Univerzi v Ljubljani z bratrancem A. Peterlinom sodeloval pri javnih ljubljanskih predavanjih o radioaktivnosti.¹¹

Peterlin se je leta 1926 najprej vpisal na študij mehanskega inženirstva ljubljanske univerze, vendar ga je Rihard Zupančič pred koncem prvega semestra nagovoril k prepisu na čisto matematiko pri filozofski

fakulteti. Tudi na univerzi ni imel najboljših profesorjev, zato je rad poslušal Plemljeva matematična in Vidmarjeva elektrotehniška predavanja. V tretjem semestru je postal pomožni asistent za opisno geometrijo inž. Milana Fakina in dolžnost opravljal tri leta.

Julij Nardin je znal eksperimentirati z vakuumskimi napravami, kot predavatelj pa ni bil med najboljšimi; tako je Peterlin obiskal le eno njegovo predavanje. Po aprilu 1928 je poslušal predavanja Huga Sirk, čeprav so bila matematično pomanjkljiva in posvečena predvsem elektriki; vse drugo je povedal v nekaj tednih. Sirkove slabosti so študentje krepko občutili, saj so imeli domala vsi matematiko za svoj poglavitni predmet. Peterlin se je mesec dni pri F. Hallaju na Institutu za fizikalno kemijo dunajske Tehniške visoke šole učil tehnike merjenja sipanja rentgenskih žarkov pod širokimi koti in prvič uporabljal vrhunsko vakuumsko tehnologijo.

Še pred koncem matematičnih študijev je Peterlin v četrtem letniku postal Sirkov asistent-predavatelj. Leta 1930 je z odličnim uspehom diplomiral iz matematike na Filozofski fakulteti v Ljubljani. Istega leta sta postala Peterlin in Anton Kuhelj pomožna asistenta na Tehniški fakulteti. Leta 1930/31 je Peterlin na Ženski realni gimnaziji (liceju) učil fiziko v osmem razredu, leta 1931/32 pa je predaval na Uršulinski gimnaziji.

Po diplomi je Peterlin pri Sirku meril sipanje rentgenskih žarkov v tekočinah povsem brez haska, saj bi lahko izračunal, da bo efekt prešibak. Peterlin mu je pomagal postaviti uvodno predavanje za vse študente tehnike in filozofije. Peterlin je leta 1933 postal Sirkov asistent. Leta 1934 je Sirk objavil razpravo o rentgenskih žarkih v magnetnem polju; na koncu se je Peterlinu lepo zahvalil za pomoč.¹² Peterlin je asistentsko mesto obdržal tudi po Sirkovem imenovanju za docenta dunajske univerze leta 1934/35, ko Sirku niso podaljšali ljubljanske pogodbe in se je vrnil na Dunaj. Predavanja fizike na ljubljanski Tehniški fakulteti je prevzel docent za mehaniko Kuhelj.

V šolskem letu 1935/36 je Kuhelj predaval fiziko v Ljubljani, Peterlin pa je začel predavati eksperimentalno fiziko jeseni 1936. Šest ali sedem let je bil Peterlin edini predavatelj eksperimentalne fizike v Ljubljani. Kot asistent je organiziral fizikalni praktikum in skoraj deset let vodil poskuse študentov.¹³

Od februarja do maja leta 1936 je Peterlin pri profesorju Dragoljubu Jovanoviću v Beogradu meril sipanje rentgenskih žarkov na tekočem tetraklorogljiku. Žal je bila fizika v Beogradu slaba. V Zagrebu

¹⁰ Vodopivec, 1971, 94; SBL, 2: 321; 4: 864.

¹¹ Pismo sestre Marje Lapajne Peterlinu v ZDA 30. 5. 1955; pismo K. Paučnikove Peterlinu 7. 9. 1955, prejeto 12. 9. 1955 (GDP).

¹² Sirk, 1934.

¹³ Bartol, 1961, 108.

so imeli vsaj eksperimentalnega in teorijskega fizika, vendar Peterlina niso hoteli vzeti za doktoranda.

Peterlin je spisal razpravo o sipanju rentgenskih žarkov v tekočinah, ki mu jo je R. Zupančič temeljito jezikovno popravil. Sprejeta je bila za tisk v *Physikalische Zeitschrift* in objavljena v prvih mesecih leta 1936. To je Zupančiča tako navdušilo, da je Peterlinu napisal prošnjo za štipendijo v Nemčiji za leto 1937/38, ki je imela uspeh.

Dne 1. 11. 1937 je Peterlin prišel v Nemčijo. V letih 1938/39 je delal na Fizikalnem inštitutu berlinske univerze, predhodniku današnjega Instituta Max Planck, in tam tudi doktoriral leta 1938 pri profesorju Stuartu iz viskoznosti raztopin sferoidov, čeravno si je želel za mentorja Petra Debya, ki je pred dvema letoma dobil Nobelovo nagrado za kemijo za raziskovanje dipolnih momentov in je že tri leta vodil Fizikalni inštitut v Berlinu. Debye je med prvimi začel raziskovati polimere, kar je postalo pozneje Peterlinovo osnovno področje dela. Aprila 1939 je Peterlin po vrnitvi v Ljubljano postal docent fizike, leta 1940 pa docent na filozofski fakulteti, da je Zupančič lahko na Tehniški fakulteti obdržal predstojništvo nad oddelkoma za matematiko in fiziko. Leta 1940 je Moljk postal asistent na Zavodu za fiziko, Peterlin pa honorarni predavatelj fizike na Tehniški fakulteti.

Leta 1940 je docent Peterlin objavil učbenik fizike za svoje študente, ki sta ga tehniško opremila absolventa montanistike Bolgara Aleksander Barliev in Georgij Kotov. Učbenik so ciklostirali v več deset izvodih, vendar ga je bilo že kmalu po vojni nemogoče dobiti.¹⁴ Peterlin je v njem opisal klasično fiziko v štirih delih: mehanika, toplota, elektrika (z magnetizmom) in optika. Dodatnih poglavij, kot so bila sicer v navadi v srednješolskih učbenikih (astronomija, atomi, meteorologija) Peterlin ni zapisal. Učbenik je bil izdan le leto dni pred Sirkovo učno knjigo fizike za naravoslovce in kemike. Vendar Peterlinov učbenik zaradi pomanjkanja časa ni bil nikoli natisnjen, čeprav je Peterlin v tipkopis med svojimi ljubljanskimi predavanji vnašal dopolnila in popravke. Iz Peterlinovega tipkopisa izhajajo vsi poznejši slovenski fizikalni učbeniki. Peterlin je tekst natipkal od roba do roba in ga opremil s številnimi skicami matematičnih likov in fizikalnih poskusov. Sestavil je 344 strani A4-formata v 56 poglavjih z dodatnimi tremi neoštevilčenimi stranmi, polnimi izboljšanih slik iz teksta.

Moderna fizika, poznejša fizika II, je bila nakazana le v zadnjih štirih poglavjih elektrike (pogl. 42.

Razelektrenje v plinih (str. 257); 43. Elektroni iz žarečih kovin (267); 44. Rentgenovi žarki (272); 45. Radioaktivnost (275–280)) in v predzadnjih poglavjih svetlobe (54. Svetlobni spektrum (328); 55. Kvantni efekti svetlobe (332–336)).

Ob razelektritvah v plinu je podrobno opisal in narisal vakuumске elektronke: "Če v cevi z dvema elektrodama (katoda in anoda) znižujemo pritisk, dobimo pri pritisku par cm živega srebra in nekaj 100 V napetosti svetel, modrikasto rdeč trak skozi cev, ki postaja pri padajočem pritisku vedno širši".¹⁵ "Vakuum 10^{-5} do 10^{-6} torr (praktično moremo komaj doseči še boljši vakuum) je popoln izolator, ker mu manjkajo nosilci toka, moremo pa v njem prevajati tok, če mu damo umetne nosilce (elektroni in žareče katode)."¹⁶

Rentgenski žarki so bili tedaj in še pozneje osnovno Peterlinovo eksperimentalno orodje, zato jih je podrobno opisal: "Poleg uporabe v medicini pride prosevanje z rentgenovimi žarki v poštev v tehniki pri tako zvani grobi preiskavi materiala. Gre nam pri tem za izsleditev nehomogenosti, razpok, zračnih mehurčkov, vložkov žlindre ali drugih onečiščenj v odlitkih, za preiskavo varjenih šivov in hudo obremenjenih delov konstrukcije. Zelo enostavno se dajo na ta način preiskavati lahke kovine (aluminij, magnezij itd.) do debeline več cm, pri železu, bakru itd. pa imamo uspeh le pri tanjših kosih (pločevine)..."¹⁷ Poglavje o rentgenskih žarkih je nameraval dopolniti z opisom njihovega uklona in elektronskih interferenc.¹⁸

Einsteinovo relativnostno teorijo je omenil le mimogrede z enačbo o pretvorbi mase v energijo na koncu poglavja o radioaktivnosti "Posebno velike energije najdemo v tako zvanih višinskih žarkih, katerih izvora še ne poznamo. To žarkovje sestoji v bližini zemeljskega površja iz zelo trdnih žarkov γ , žarkov pozitronov, elektronov in mezonov. Največje energije, ki so jih merili na teh žarkih, dosegajo vrednost $2 \cdot 10^{11}$ eV, kar je prav energija, ki tiči v masi najtežjega jedra urana (mc^2)."¹⁹ Po poznejših zapiskih v domači izvod učbenika je Peterlin tu nameraval vstaviti poglavje o fiziki atomskega jedra.

Malo več, vendar znova brez omembe Einsteina, je zapisal o posebni teoriji relativnosti v podpoglavju o Dopplerjevem efektu: "Opazovanja pa so pokazala, da je Dopplerjev efekt odvisen samo od relativnega gibanja svetila in opazovalca, da pa je popolnoma vseeno, kdo se giblje ... Gibajoče se svetilo: opazovanje na kanalskih žarkih, gibajoči se opazovalec:

¹⁴ Sporočilo Saše Svetine 6. 12. 2006.

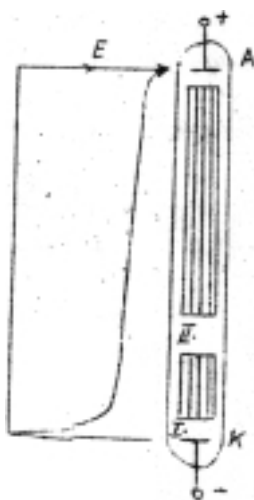
¹⁵ Peterlin, 1940, 261.

¹⁶ Peterlin, 1940, 262.

¹⁷ Peterlin, 1940, 273–274.

¹⁸ Peterlinovi zapiski v letnem semestru 1950 k učbeniku iz leta 1940 (GDP).

¹⁹ Peterlin, 1940, 280.



Slika 2: Vakuumna elektronka v našem prvem univerzitetnem učbeniku fizike (Peterlin, 1940, 261 in dodatek 1)

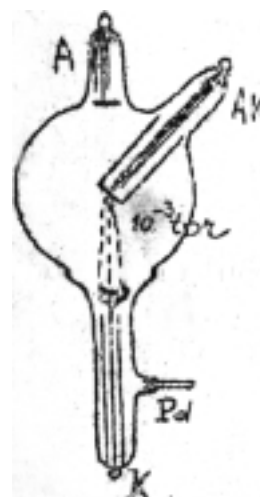
opazovanje astronomskih objektov in premikajoče se zemlje. – To razliko med opazovanjem in zgornjo klasično razmišljavo (mirujoči eter) je odpravila relativnostna teorija, ki zahteva, da uporabimo pri premikajočih se sistemih tako zvane Lorentzove transformacije, ki jih dobimo iz zahteve, da je svetlobna hitrost v vseh enakomerno in premočrtno se premikajočih sistemih enaka. Iz te predpostavke pridemo do sklepa, da se v premikajočem se sistemu spremenita tako dolžina kot tudi čas (šitridimenzionalni prostor)."²⁰

Pri spektru svetlobe je nadaljeval opis deda svoje bodoče žene Maksa Samca iz leta 1871. Seveda je Peterlin že vpeljal elementarni kvant učinka, pri katerem sicer ni citiral Plancka.²¹ Posebej je opisal »trakaste« spektre molekul, ne da bi omenil svojega pozneje poglobitnega raziskovalnega področja, makromolekul. Za to področje raziskovanja se je dokončno opredelil komaj nekaj let pozneje.

Pri kvantnih efekih je podrobno opisal fluorescenco, fosforescenco in fotoefekt z Einsteinovim zakonom. Stefanovega zakona za sevanje ni omenil.

Peterlin se je februarja 1941 poročil z učiteljico matematike Leopoldino (Oli) Leskovic. Oli je ob koncu vojne na gimnaziji učila maturantko Bibijano Dobovišek, pozneje poročeno Čujec, ki je po vojni študirala pri njenem možu.

Aprila 1941 je bil Peterlin za kratek čas vpoklican k vojakom v okolico Cerknice, vendar je fronta hitro razpadla in je pod italijansko zasedbo nadaljeval predavanja v Ljubljani. Maja 1942 so Italijani iskali Peterlinovega asistenta Škerlaka zaradi ilegalnega razpečavanja partizanskih novic. Ker ga niso dobili, so



Slika 3: Rentgenska vakuumna elektronka v našem prvem univerzitetnem učbeniku fizike (Peterlin, 1940, 272)

zaprli kar Peterlina za dva tedna. Po izkrcanju v Normandiji so ga maja 1944 zaprli domobranci. Po ženinem posredovanju na podlagi Stuartovih pisem z vabili za nadaljevanje znanstvenega dela je bil Peterlin interniran v Dresden. Tam se je pri profesorju Stuartu že povsem zavestno odločil za raziskovanje velikih molekul, s katerimi se je poslej uspešno ukvarjal štiri desetletja. Srečno se je izognil zavezniškemu bombardiranju Dresdna februarja 1945, saj je božične počitnice preživel v Sloveniji in nato odlašal z vrnitvijo.²² Delal je v pletilni tovarni v Radovljici v bližini polsestrine domačije; baje nikoli ni imel toliko prostega časa v življenju kot v tistih radovljiških popoldnevih. Dne 29. 12. 1944 se je iz Ljubljane zahvalil tajniku SAZU Franu Ramovšu za potrdilo o svoji službi na Univerzi v razmeroma pogumnem pismu: "Velecenjeni gospod profesor! ... Po vojni bo treba napeti vse sile, da si bomo tudi na ljubljanski univerzi ustvarili pogoje za znanstveno delo v naravoslovju."²³

4 PROFESOR PETERLIN ORGANIZIRA IJS Z UPORABO VAKUUMSKIH TEHNIK

Med vojno je izginila ali bila uničena večina opreme Fizikalnega inštituta. Takoj po osvoboditvi sta začela Peterlin in docent Moljk iskati po zapuščenih nemških vojaških skladiščih uporaben material. Veliko nista našla, razen radarskih naprav z elektronikami; le-te so bile uporabne za volt- in ampermetre, ki jih ni bilo. Vsi novi aparati v fizikalnem praktikumu so bili napravljeni iz tega materiala.²⁴

²⁰ Peterlin, 1940, 284.

²¹ Peterlin, 1940, 330.

²² Novice IJS, marec 2003; sporočilo Tanje Peterlin-Neumaier 2006.

²³ Prečrtal Peterlin, Zapuščina Frana Ramovša, Knjižnica SAZU.

²⁴ Peterlin-Neumaier, 2003, 69.

Konec avgusta 1945 se je Peterlin skupaj z Moljom in Kuhljem napotil proti Milanu s Kidričevimi tremi milijoni lir v treh kovčkih za nakup vakuumske raziskovalne opreme. Bankovci so bili po sto lir, tako da je bila prostornina tovara kar zajetna. Vlada je pridobila denar s spremembo tečaja, predsednik Boris Kidrič pa ga je dal po posredovanju svojega očeta, predsednika SAZU slavista Franceta Kidriča. Trije ljubljanski univerzitetni profesorji so potovali z avtobusom iz Trsta v Milano, vendar so zaradi tihotapstva ravno dan poprej začeli z rutinskimi pregledi potnikov v Vicenzi. Kovčki z denarjem so jim bili odvzeti v Vicenzi, kjer so jih 1. 9. 1945 zaprli v vojaške zapore; le pol milijona lir so za Jugoslavijo naložili v italijanski banki. Novembra so vse tri premestili v taborišče za begunce in nato v britanski vojaški zapor v Padovi. Izpuščeni so bili šele tik pred božičem 1945. Boris Kidrič je po tej polomiji povedal nekoliko hudomušno, da je znanost mogoča celo brez denarja.

Leta 1945 je Peterlin postal redni profesor na Univerzi v Ljubljani. Imel je asistenta Slovenca iz italijanskega zamejstva, ki pa se je smrtno ponesrečil ob padcu po stopnicah Univerze.²⁵ Leta 1946 so Peterlina imenovali za izrednega in leta 1948 za rednega člana SAZU; konec leta je tudi stric Peterlinove žene Maks Samec postal redni član SAZU v istem razredu za matematične, tehniške in fizikalne vede.

Po sporih z Informbirojem so se gmotne in z njimi znanstvene razmere v Jugoslaviji znatno izboljšale. Leta 1948 se je Peterlin lahko udeležil znanstvene konference v Parizu v počastitev nedavno preminulih Langevina in Perrina. Obisk je z vabilom podprl eden urednikov *J.chimie physique*, polimerski fizik Charles Sadron iz Strasbourga.²⁶ Peterlin ga je spoznal malo pred vojno julija 1939.

V začetku decembra 1948 je Boris Kidrič dal nalogo Peterlinu za zbiranje podatkov o jedrski energiji. Februarja 1949 je na sestanku pri Kidriču v Beogradu Peterlin sprejel nalogo, da bo organiziral jedrski institut v Ljubljani, katerega pglavitna naloga naj bi bila zgraditev reaktorja. Pri načrtovanjih je prišel v nasprotje z vodilnim beograjskim fizikom Pavlom Savićem. Savić je leta 1932 diplomiral fizikalni kemijo v Beogradu in meril sevanje pri profesorju Jovanoviću. Od leta 1934 do vojne je sodeloval z Ireno Curie v Parizu pri pripravi odkritja cepitve jedra. Leta 1945 je v Beogradu postal profesor fizikalne kemije, leta 1946 član akademije, med letoma 1971 in 1981 pa njen predsednik. Kot nekdanji vodja zaup-



Slika 4: Peterlin eksperimentira v 1950-ih letih

nega oddelka za šifre Titovega vrhovnega štaba je s položaja direktorja instituta v Vinči skušal usmerjati razvoj fizike v Jugoslaviji, predvsem v smeri izdelave jedrske bombe. Pred Savićem je moral Peterlin po Kidričevi smrti kar nekako skrivati svoje raziskovanje makromolekul, ki se le-temu ni zdelo obetavno; jedrsko fiziko si je predstavljal kot edino zveličavno. Tako sta pri Peterlinu lahko iz njegovega osnovnega področja doktorirala le fizik M. Čopič in kemik G. Mohorič iz strujnega dvojnega loma oziroma sinteze poliindenov. Peterlin je Čopiča poslal na usposabljanje v ZDA, da se je poslej lahko posvetil reaktorjem.

Peterlinova zveza s politiki v Beogradu je bil Titov generalni sekretar med letoma 1953 in 1958, pravnik dr. Joža Vilfan,²⁷ Peterlinov mladostni prijatelj in kranjski dijak njegovega strica. Nekdanji študent kemije Boris Kidrič je poznal sposobnosti štiri leta starejšega Peterlina in mu je dovolil, da je okviru Fizikalnega instituta nadaljeval svoje raziskovanje velikih molekul. Institut, ki je medtem po Peterlinovem predlogu dobil ime po Jožefu Stefanu, je vodil celo desetletje do leta 1959.

Peterlin se je eksperimentalnih prijemov naučil pri Sirku. Čeprav mu je sprva sledil pri kvantno-mehanskih poskusih, je med prvimi prav Peterlin dojel velike možnosti raziskovanja trdne snovi in novih materialov. Tako se je posvetil predvsem raziskovanjem makromolekul in je bil po drugi svetovni vojni najbolj priznan slovenski fizik. Tako ob ustanavljanju jedrskega instituta v Ljubljani ni bilo druge izbire in so za direktorja s širokimi pooblastili izbrali prav Peterlina, čeravno je bilo njegovo raziskovalno

²⁵ Ivan Vidav, pismo Tanji Peterlin-Neumaier, 10. 7. 2006 (GDP).

²⁶ Peterlinovo pismo Ladu Kostu 23. 8. 1955.

²⁷ Peterlinovo pismo Joži Wilfanu (Vilfan, * 6. 7. 1908 Trst) iz Detroita v Beograd 23. 7. 1955, ki ga ni odposlal, temveč je napisal drugo pismo (GDP; SBL, 4: 469).

področje daleč od jedrske bombe. Odločitev je bila pravilna, saj je Peterlin pokazal izreden dar za organizacijo in je v kratkem času postavil na noge izredno učinkovit znanstveni institut po zahodnih vzorih.

Prostori fizikalnega instituta so bila sprva pri SAZU, med letoma 1949 in 1953 pa so gradili novo stavbo na križišču Jamove in Jadranske. Delavci pri gradnji Instituta so bili predvsem zaporniki, med njimi fizik Tone Prelesnik. Na Prešernov dan leta 1953 so slovesno odprli novi Fizikalni Institut, ki je odtlej nosil ime Jožefa Stefana. Dobra dva meseca po slovesnosti je Peterlinov mogočni zaščitnik Boris Kidrič umrl. Istega leta je Peterlin v reviji *Nature* objavil račun persistenčne dolžine DNK oziroma njene elastične konstante na osnovi Dotyjevih harvardskih meritev sipanja svetlobe v raztopinah DNK. Dva meseca pozneje sta Watson in Crick v isti reviji objavila odkritje DNK, Peterlinov račun pa je znova postal zanimiv 40 let pozneje.²⁸

Temelji za obe stavbi na Jadranski so dolgo čakali na začetek gradnje. Leta 1960 so zgradili stavbo fizikalne fakultete na Jadranski 19, medtem ko je predvidena stavba matematike nasproti njej čakala s svojimi temelji na Računski center; napovedan vmesni paviljon ni nikoli zagledal belega dne.²⁹

Leta 1955 je profesor Peterlin od srede maja do konca decembra gostoval pri profesorju Wilfriedu Hellerju s kemijskega oddelka Wayne State University v Detroitu; prav tedaj se je nekoliko zahodnejše v San Franciscu rodil pisec teh vrstic. Peterlin je iz ZDA s številnimi pismi vodil delo IJS. Žena ga je hotela obiskati, vendar je v prošnjo za vizo zapisala, da je članica SZDL, kar je kot učiteljica seveda morala biti. Prošnja ji ni bila odobrena.³⁰

Ob Peterlinovem odhodu v ZDA so 16. 5. 1955 na seji znanstvenega sveta IJS sprejeli nov statut s samo tremi organi: upravnim direktorjem, znanstvenim svetom pod predsedstvom Peterlina in svetom, pozneje upravnim odborom. Za upravnega direktorja so predlagali Karola Kajfeža, ki je zato zapustil službo pri železnici. Osredkar, ki je prišel na Institut iz SUZUP-a (Zvezna uprava za napredek proizvodnje) leta 1952/53, ni imel več nobene upravne funkcije v IJS.³¹

Edvard Cilenšek, ki je na IJS delal od leta 1950 do odhoda v Iskro leta 1965, je v poročilu Peterlinu za mesec junij 1955 opisal delo vakuumskega laboratorija A1. Na elektrostatičnem pospeševalniku so merili netesnost vseh vakuumskih elementov z McLeodom, na panel ploščo radiofrekvenčnega ionskega izvira pa so postavili usmernik za Penningov³² merilnik vakuuma. Razvili so napajalnik za Leyboldovo ionizacijsko triodo Telefunken IM 5, v delu pa so imeli prototip ionizacijske triode IM 5 in 5 Penningovih merilnikov vakuuma s priključnim konusom M19.³³ V poročilu za julij se je Cilenšek pritoževal nad tekočim zrakom iz Ruš, saj so se slabo izolirane 15-litrške posode včasih kar spraznile na poti na IJS. Doma so izdelali difuzijsko črpalko za 60 L/s, uporabljali pa so še nekoliko slabšo Edwardsovo črpalko in Knudsenov vakuumski merilnik.³⁴ Septembra 1955 so pri Cilenšku izdelali in preizkusili pretočno zaščito za izklop kurjave difuzijskih črpalk pri izpadu vode in izdelali ionizacijsko triodo. Oktobra so izmerili največjo sesalno hitrost 300 L/s difuzijske črpalke, izdelane za podjetje Elektrozveze. Dosežena je bila pri moči 1200 W ob uporabi klofena pri tlaku 10^{-4} mm Hg.³⁵ Peter Zazula je gradil vakuumsko napravo za umerjanje v laboratoriju za masno spektroskopijo pod vodstvom Janeza Dekleve,³⁶ v začetku oktobra 1955 pa je začel pri njih delati inženir Alojz Paulin.³⁷

Dne 28. 6. 1955 je Peterlin pisal iz Detroita pismo, ki je prispelo na IJS 8. 7. 1955.³⁸ Predlagal je, naj enega od novih kemikov ali fizikov pošljejo na tečaj jedrskega inženirstva na Univerzo New York. Do tedaj je to panogo razvijal le Zagrebčan F. I. Havliček, sedaj pa je Peterlin hotel na tem mestu predvsem Osredkarja in se je nekoliko jezil, ker je le-ta odlašal s svojim odhodom v New York in mu je dne 6. 7. 1955 pisal, da noče odpotovati. Osredkar je po daljšem premišljevanju ugotovil, da bo za svojo nadaljnjo kariero potreboval doktorat. Dne 29. 7. 1955 je po ureditvi vprašanja dnevnic sporočil, da bo odšel v New York. Dne 23. 8. 1955 je Peterlin z zamudo napisal priporočilo zanj. Osredkar je odšel v Beograd h generalnemu tajniku ZKNE (Zvezna komisija za nuklearno energijo) Slobodanu Nakićenoviću in nato v New York, tako da se je Kajfež lahko že 26. 9. 1955 preselil v njegovo sobo na IJS.

²⁸ Za informacijo se zahvaljujem Rudolfu Podgorniku.

²⁹ Saša Svetina, 6. 12. 2006.

³⁰ Sporočilo Tanje Peterlin Neumaier 6. 12. 2006.

³¹ GDP.

³² F. M. Penning pri Philipsu leta 1937 s povojnimi izboljšavami.

³³ Pismo Marje Lapajne bratu Peterlinu v ZDA 9. 7. 1955, prejeto 13. 7. 1955 (GDP).

³⁴ Pismo Marje Lapajne bratu Peterlinu v ZDA 30. 7. 1955 (GDP).

³⁵ Pismo Marje Lapajne bratu Peterlinu v ZDA 5. 11. 1955, stran 3 (GDP).

³⁶ Janez Dekleva, pismo Peterlinu 30. 7. 1955 (GDP).

³⁷ Karel Kajfež, pismo Peterlinu 10. 10. 1955, prejeto 13. 10. 1955 (GDP).

³⁸ Arhiv IJS v Podgorici, zapuščina M. Osredkar, dostavil Janez Stepišnik 31. 1. 2006.

Peterlin je iz ZDA pogosto pisal Kajfežu in drugim sodelavcem. Dne 20. 9. 1955 je obiskal Univerzo v Chicagu;³⁹ tam si je ogledal *Institute for Nuclear Studies*, ki "je ogromna stvar, za 3 ljubljanske, imajo sinkrotron za 450 MeV za protone, betatron za 100 MeV, ogromno elektronike, masnih spektrometrov in sploh vsega šmenta. Ogledal sem si le neznan delček vsega ogromnega aparata. Naslednji dan me je potem opoldne dr. Chupka peljal v Argonne, 40 km proč, kjer sem imel na žalost le zelo malo časa, da sem videl le masno spektrometrijo in pa šolo za reaktorsko inženirstvo."⁴⁰

Leta 1957 je pri Peterlinu doktoriral Anton Moljk, v komisiji pa sta bila še Kuščer in Dominko. Zagovor je bil v prvem nadstropju stare univerze v prostoru z balkonom, obrnjenim proti Kongresnem trgu. Dominko vprašan ni postavil, Kuščerja pa je zanimal izkoristek toplote. Peterlin je postavil tri vprašanja, posebno zapletenega tretjega o spektru beta-žarkov v vakuumu. Po zasedanju komisije je poročevalec dr. Ivan Vidav prišel sporočit, da je kandidat Moljk uspešno opravil doktorski izpit. Promocija je sledila že naslednji teden.

Nasprotno od Plemlja je Peterlin kmalu dobil v lastni hiši vplivne nasprotnike, saj na univerzi ni imel prave podpore za razvoj instituta. Na začetku leta 1959 je imel novi institut že 300 zaposlenih. V tretjem letniku je Peterlin že sedemnajsto leto predaval elektromagnetno polje z relativnostno teorijo in optiko, v četrtem pa kvantno in jedrsko teorijo (1943–1959).⁴¹ Predavanja elektromagnetnega polja je po njegovem odhodu prevzel Blinc.

Tragična nesreča v Vinči je 15. 10. 1958 prizadela več delavcev in delavk. Po sevanju so jih takoj odpeljali v Pariz, kljub temu pa je ena oseba umrla. Čeprav Pavle Savić ni bil neposredno kriv,⁴² je bil kot predsednik znanstvenega sveta v Vinči postavljen v mat-položaj, saj funkcija predsednika sveta instituta po reformah ni več pomenila resnične moči v Vinči, na Institutu Rudjer Bošković v Zagrebu ali na IJS. Leta 1959 je moral Savić odstopiti, istočasno pa še Peterlinov prijatelj Ivan Supek na Institutu Rudjer Bošković v Zagrebu, Peterlin pa na IJS. Vendar sta se Peterlinov prijatelj Supek in nasprotnik Savić kmalu vrnila na položaja, medtem ko je bil Peterlin po 8. 1. 1959 le še univerzitetni profesor.

Po razrešitvi s položaja predsednika znanstvenega sveta IJS je Peterlin odšel v tujino, potem ko je 5. 3. 1959 z novim direktorjem IJS Lucijanom Šinkovcem

sklenil enoletno pogodbo o honorarnem raziskovanju organskih kristalov z jedrsko magnetno resonanco. Peterlin je najprej obiskal Stuarta na Institutu fizikalne kemije Univerze v Mainzu dne 9. 3. 1959 in pol leta sodeloval z njegovim asistentom Fischerjem pri raziskovanju termodinamične stabilnosti posameznih polimernih kristalov. Z NMR sta raziskovala kristale polietilena, za katere je Fischer neodvisno od Madžara Andrewja Kellerja v Bristolu in P. H. Tilla v ZDA leta 1957 ugotovil, da vsebujejo nagubane molekulske verige. Odkritje je postalo temelj nove glavne veje polimerne fizike. Aprila 1961 je v Münchnu Peterlina za teden dni obiskal ljubljanski profesor Fran Dominko in ga skušal nagovoriti, naj se vrne v Slovenijo. Ker mu ni mogel ponuditi ničesar oprijemljivega, se Peterlin ni vrnil.⁴³

Po šestmesečnem delu v Mainzu je bil Peterlin od junija od oktobra 1959 v Ljubljani. Dne 11. 9. 1959 je ljubljanska univerza Peterlinu odobrila podaljšani dopust za osem mesecev.

Peterlin je bil med letoma 1955 in 1957, ko ga je Kajfež nadomestil na direktorskem položaju, ob funkciji predsednika upravnega sveta še predsednik sveta na IJS. Leta 1957 ga je na tem položaju kot predsednik upravnega odbora zamenjal Boris Kraigher in funkcijo leta 1958 predal Viktorju Kotniku. Tako je bil Kraigher s strani politike delegiran za ureditev odnosov na IJS; ni mogel zadržati Peterlinovega padca, Peterlinu pa je bil itak "vse prej kot naklonjen".⁴⁴ Dne 13. 12. 1959 je Peterlin pisal Kraigherju z univerze Cambridge v Bostonu in se mu zahvalil za pomoč pri pridobivanju štipendije ZKNE. Peterlin se je v Cambridgeu "izvrstno zasidral" čeprav mora "zaradi nekih delnih računov v Philadelphijo". Pri tem je seveda Kraigherju sporočil, da hoče še leto dni dlje ostati v tujini, kjer si vsi prizadevajo, da bi mu delo čim bolj olajšali, medtem ko se doma trudijo "da mi napravijo življenje čim bolj težko in neznosno ... da razženejo skupino, s katero sem delal, in ji onemogočijo izpopolnitev aparature. Že leto dni leži v parafiniran papir zavrt magnet, ki je stal le 10 000 \$ in je bil naročen še v mojih časih, brez upanja, da bi se kdaj rabil za znanstvena raziskovanja, za katera je bil kupljen, ker se pač ne smejo kupiti dodatni deli, ker bi to aparaturo utegnili koristno uporabiti jaz in ljudje, ki so doslej z menoj sodelovali. Analogni računski stroj ponujajo po Ljubljani, na žalost ni interesentov zanj izven instituta, da bi s tem dokazali, da je bila ideja z njim ena izmed mojih

³⁹ GDP.

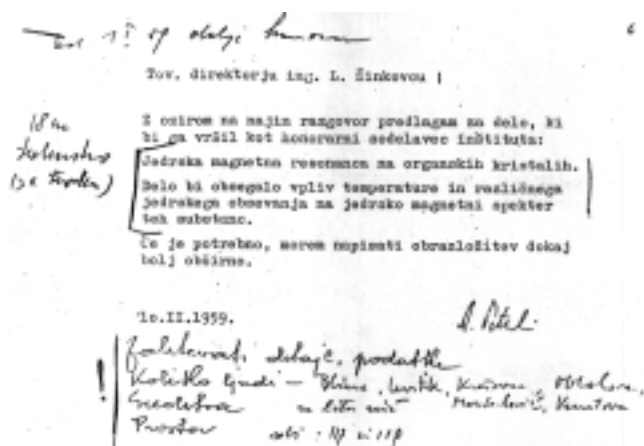
⁴⁰ Peterlinovo pismo ženi 24. 9. 1955 (GDP).

⁴¹ Bartol, 1961, 110.

⁴² Peterlin, pismo Kraigherju 6. 8. 1960, priloga, stran 4a (GDP).

⁴³ Peterlinovo pismo Kraigherju 11. 5. 1961; Kraigherjevo pismo Peterlinu 26. 7. 1961, stran 1 (GDP).

⁴⁴ Peterlinovo pismo Ivanu Supeku v Zagreb 12. 10. 1960 (GDP).



Slika 5: Dne 10. 2. 1959 je Peterlin na osnovi razgovora s Šinkovcem predlagal svojo honorarno zaposlitev pri merjenju jedrske magnetne resonance na organskih kristalih. Delo naj bi obsegalo vpliv temperature in različnega jedrskega obsevanja na NMR-spekter teh substanc. V tipkopisu je menil, da lahko podrobnosti dela še podrobneje razloži.

neumnosti ...” Peterlin je bil mnenja, da njegovi nasledniki v šestih mesecih vodenja IJS niso dokazali svojih sposobnosti in so zapravili trud prejšnjih desetih let tožarjenja pri vladi.

Peterlin je Kraigherju napovedal svoj odhod v Detroit marca 1960; tam je na zmogljivem računalniku preračunaval difuzijski problem z rezultati iz Mainza. Kraigherju je natrosil obilo podrobnosti, ki jih le-ta niti ni mogel razumeti. Do neke mere je Peterlin skušal s temi podrobnosti upravičiti državno štipendijo, po drugi strani pa je z znanjem kazal svojo moč.

Med obiskom v Bostonu na Harvardu (december 1959–marec 1960) je Peterlin dobil mamljivo vabilo za vodenje Fizikalnega instituta Tehniške univerze München. Ob delu na Wayne State University v Detroitu od marca do junija 1960 je Peterlin je dobil ponudbo profesure na tamkajšnji univerzi. Dolgo se ni mogel odločiti, ali se morda le ne bi vrnil domov. Odločitev je padla šele 19. 7. 1960 po prihodu žene in sina v Beljak:⁴⁵ dne 1. 9. 1960 je prevzel vodenje Fizikalnega instituta Tehniške univerze München do leta 1961.

Boris Kraigher je Peterlinu javil, da se težave na IJS nadaljujejo tudi pod novim vodstvom. Kraigher si je zaradi Rankovičeve kritike želel Peterlinovega osebnega obiska, o katerem bi poročali časopisi; tako bi javnosti prikri, da je Peterlin po prisilnem odhodu takoj dobil visok položaj v Münchnu. Nevoščljivci so po Ljubljani seveda šušljali, da nemška fizika ni več tisto, kar je bila.

Leta 1961 je Peterlin odšel v ZDA in tam nadaljeval uspešno raziskovanje in organiziranje. Vmes je

nadvse rad gostoval s predavanji v Sloveniji, še posebej na IJS, vendar šele potem, ko je novi direktor Osredkar obnovil stike z njim leta 1963. Američani so Peterlina seveda radi postavili na vodilni položaj novega instituta v Severni Karolini, saj so poznali njegove uspehe pri organizaciji IJS. Kot direktor laboratorija Camille Dreyfus v Durhamu (1961–1973) je raziskoval makromolekule v razmerah, ki bi jih lahko doma le sanjal. Po obvezni upokojitvi s 65. letom starosti je med letoma 1973 in 1984 delal na Nacionalnem biroju za standarde v Washingtonu, D. C. (NBS), po letu 1975 pa kot pomočnik direktorja oddelka za polimere. V Sloveniji je sodeloval predvsem s skupino Roberta Blinca pri NMR. Po drugi upokojitvi je Peterlin raziskoval v svoji pisarni na NBS za vse do drugega zloma kolka decembra 1991.

5 SKLEP

Peterlin je zaznamoval začetek sodobne fizike v Ljubljani na najboljši možni način. "Darilo", ki so mu ga ob srečanju z Abrahamom priredili nevoščljivci, morda ni bilo najbolj prijetno, je pa Peterlinu v ZDA odprlo obzorja kot pred njim še nobenemu slovenskemu znanstveniku.

6 SEZNAM OSEB

- Peter Debye (* 1884; † 1966).
- Paul M. Doty (* 1. 6. 1920 Charleston).
- Erhard W. Fischer (* 1929 blizu Leipziga).
- Valentin Kušar (* 1873 Rateče pri Škofji Loki; † 1962).
- Ivan Kuščer (* 1920; † 2002).
- Anton Moljk (* 1916; † 1998).
- Hans Pernter (* 3. 10. 1887 Dunaj; † 25. 7. 1951 Bad Ischl).
- Boris Matija Peterlin (* 4. 7. 1947).
- Anton Peterlin (* 1866 Ljubljana-Šiška; † 1912 (Vodopivec, 1971, 94)).
- Anton Peterlin (* 25. 9. 1908 Ljubljana; † 24. 3. 1993).
- Tatjana Peterlin poročena Neumaier (Tanja, * 18. 3. 1945).
- Charles Sadron (* 1902 Cluis; † 1993 Orléans).
- Maks Samec (* 10. 10. 1844 Arclin pri Vojniku pri Celju; † 19. 8. 1889 Šutna v Kamniku).
- Maks Samec mlajši (* 27. 6. 1881; † 1. 6. 1964).
- Pavle Savić (* 10. 1. 1908 Solun; † 1994).
- Hugo Victor Carl Sirk (* 11. 3. 1881 Gradec; † 15. 12. 1959 Dunaj).
- Herbert Arthur Stuart (* 1899; † 1974).
- Ivan Supek (* 1915).

⁴⁵ Sporočilo Tanje Peterlin-Neumaier 17. 12. 2006.

7 Zahvala

Za pomoč se zahvaljujem dr. Tanji Peterlin-Neumaier in knjižničarju SAZU Dragu Samcu, za gmotno podporo iz Mellonovega sklada pa oddelku zgodovine znanosti Univerze Oklahoma.

8 LITERATURA

- Bartol, Vladimir. 1961. Razgovor z atomskim fizikom. *Obiski pri slovenskih znanstvenikih*. Ljubljana: Mladinska knjiga. 101–114
- Bernik, Francè. 1964. Sto let kulturnega poslanstva. *Slovenska Matica 1864–1964* (ur. France Bernik). Ljubljana: Slovenska Matica. 11–32
- Bufon, Zmago. 1964. Biologija. *Slovenska Matica 1864–1964* (ur. France Bernik). Ljubljana: Slovenska Matica. 334–379
- Osredkar, Milan; Polenec, Natalija (ur.). 2000. *Pripovedi o IJS*. Ljubljana: IJS
- Peterlin, Anton. 1940. *Fizika*. Ljubljana: Ciklostirana izdaja bolgarskih študentov montanistike
- Peterlin-Neumaier, Tanja M. januar–marec 2003. Ob deseti obletnici smrti fizika prof. dr. Antona Peterlina. *Nova revija*
- Peterlin-Neumaier, Tanja M. 2004. Prtiček kot spomin na poznanstva v Kamniku in Ljubljani okrog leta 1893. *Kronika*. 52: 45–54
- Samec, Maks (prevajalec); Turgenjev, Ivan Sergeevič (*Dym*). 1870. *Dim: roman*. Gradec: M. Samec
- Samec, Maks. 1871. Črtica o vplivu podnebja na človeški organizem in razvitje njegovih bolezni. *Letopis Slovenske Matice leto 1871, II. del: Znanstvene razprave*. Ljubljana: Slovenska matica. 221–238
- Samec, Maks. 1871. Spektralna analiza. *Letopis Slovenske Matice leto 1871*. Ljubljana: Slovenska matica, II. del: Znanstvene razprave. 257–282 (17 podob)
- Samec, Maks. 1876. Možgani. *Letopis Slovenske Matice leto 1876*. Ljubljana: Slovenska matica
- Samec, Maksimilian. 1905. Durchsichtigkeit der Luft bei Verschiedenen Witterungszuständen. *Wien. Berichte*. IIa 114: 1519–1568
- Samec, Maks; Blinc, Marta. 1936. Die Quellstärken. *Kolloid-Zeitschrift*. 77: 134–140
- Sirk, Hugo. 27. 3. 1934. Der Einfluss eines Magnetfeldes auf die Streuung von Röntgenstrahlen in Flüssigkeiten. *Zeitschrift für Physik*. 89/3: 129–142
- Sirk, Hugo. 1941. *Mathematik für Naturwissenschaftlern und Chemiker. Eine einföhrung in die Anwendungen der höheren Mathematik*. Dresden und Leipzig: Theodor Steinkopff
- Smerdu, Franjo 1964. Zdravstvo. *Slovenska Matica 1864–1964* (ur. France Bernik). Ljubljana: Slovenska Matica. 380–388
- Vodopivec, Peter. 1971. *Luka Knafelj in štipendisti njegove ustanove*. Ljubljana: Kronika
- 9 Neobjavljeni viri:
- Arhiv IJS v Podgorici – Arhiv Instituta “Jožef Stefan” v Podgorici
- GDP – Gradivo družine Peterlin, hrani Tanja Peterlin-Neumaier v Münchnu
- Knjižnica SAZU – Rokopisi in tipkopisi, shranjeni v knjižnici Slovenske Akademije znanosti in umetnosti, Novi trg, Ljubljana
- Peterlin, Anton. 1970. Anton Peterlin (tipkopis, GDP)
- Peterlin, Anton. 1981. My Scientific Life (tipkopis, GDP)

SLOVENSKA ZNANOST IN INDUSTRIJA SE POVEZUJETA

Posvet o naprednih materialih 2006 na Institutu "Jožef Stefan"

Tehnološki center SEMTO (za sklope, elemente, materiale, tehnologije in opremo za elektrotehniko), Ljubljana, združuje podjetja, kjer se strokovnjaki ukvarjajo s problematiko novih materialov, to poslanstvo pa je tudi temeljni razlog in moto Posveta o naprednih materialih, organiziranega s sodelovanjem in v prostorih Instituta "Jožef Stefan" v četrtek in petek, 16. in 17. 11. 2006. Cilj posveta je bil povezati laboratorije na različnih raziskovalnih inštitucijah, univerzah in znotraj podjetij, da bi udeleženci iz industrije dobili celovito sliko na področju temeljnih in aplikativnih raziskav, udeleženci iz raziskovalnih inštitucij pa informacije o potrebah za aplikacije v izdelkih.

Interes centra SEMTO je širiti znanje, zato so organizirali posvet med strokovno in znanstveno srenjo, s ciljem, da bi pregledno predstavili stanje in smernice razvoja na področju naprednih materialov za uporabo v tehniki, elektroniki, mikroelektroniki ter polimernih in elastomernih materialov ter tako omogočili pospešen razmislek o možnostih sodelovanja. Tehnološki center ima precej članov, podjetij in laboratorijev, kjer se strokovnjaki ukvarjajo s problematiko novih materialov. Interes centra je širiti znanje med samimi uporabniki ter razvijalci novih tehnologij, saj informacije deloma zaradi razvoja niso javne. Razvoj novih materialov je ena najbolj pomembnih razvojnih smeri sodobne slovenske znanosti, še bolj pomembna pa je prepletenost gospodarske rabe z razvojem, ki je že danes velika in zelo produktivna.

Strokovnjaki, ki delujejo v industrijskih vejah, so se z znanstveniki, ki se ukvarjajo z osnovnimi in aplikativnimi raziskavami, pogovarjali o možnostih sodelovanja in pretoka znanja.

Predstavili so se strokovnjaki in raziskovalci podjetij MAGNETI Ljubljana, TECOS, Veplas, Iskraemeco, Sava, Plasttehnika, Isokon, ETI Izlake, Iskra kondenzatorji, Cinkarna Celje in mnogih drugih slovenskih podjetij, ki se ukvarjajo z razvojem novih materialov. Pri vsem tem so razvoju v industrijskih vejah v pomoč znanstveniki, ki se z razvojem materialov ukvarjajo na drugih znanstvenoraziskovalnih in izobraževalnih inštitucijah (Institut "Jožef Stefan", Fakulteta za strojništvo, Kemijski inštitut, Fakulteta za Kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Novi Gorici, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo iz Maribora itd.).

Slovenija ima na področju naprednih materialov veliko dobrih raziskovalcev, ki pa si morajo poti do

uporabnikov iskati sami oz. v sodelovanju z gospodarstvom. "Zato je takšno srečanje za vse nas tako pomembno, saj omogoča izmenjavo idej, s tem pa tudi njihovo nadgradnjo in kar se da optimalne rešitve", je ob odprtju dvodnevne srečanja na Institutu "Jožef Stefan" poudaril direktor Instituta prof. dr. Jadran Lenarčič.

Ker je bil čas posveta omejen na dva dneva, v katerih so si sodelujoči ogledali tudi laboratorije Instituta "Jožef Stefan", je moralo skoraj 50 sodelujočih prispevke predstaviti zgoščeno in pregledno. "Da zveni, mora biti material zelo trden", je povedal vodja posveta Jožef Perne, direktor Tehnološkega centra SEMTO, in za pričetek predavanj drugega dne pozvonil s keramičnim zvončkom. "Prvi dan smo veliko poslušali o keramiki," je rekel Perne, "zato ni škode, če jo drugi dan tudi uporabimo."

Možnosti za razvoj in uporabo naprednih materialov so široke in neskončne, so se strinjali sodelujoči. Med njimi je ena najbolj futurističnih morda tudi razvoj in uporaba nanožičk, o katerih je govoril prof. dr. Dragan Mihailović, ali pa razvoj trdih nanostrukturnih zaščitnih prevlek, ki ga je predstavil dr. Peter Panjan (oba Institut "Jožef Stefan"). Kako pa narediti material, ki je elastičen (širjenje po telesu), a z visoko gostoto (po snoveh), da bo lahko z uporabo pripomogel pri reševanju vsakdanjih tegob sodobnega človeka? Ena izmed v prihodnosti morda najbolj uporabnih možnosti je razvoj novih materialov za zvočno izolacijo, je ugotavljal dr. Iztok Švab iz podjetja ISOKON, Slovenske Konjice, enega od mnogih aktivnih članov grozda Plasttehnika, ki je spregovoril o razvoju (polimernih) materialov v ta namen. Hrup je zelo moteč dejavnik, negativno vpliva na počutje, psihološko stanje ljudi.

Strokovnjaki s Kemijskega inštituta so spregovorili o razvoju polimernih nanokompozitov v gumarski industriji, o razvoju polimernih nanopremazov. Čeprav se že komercialno uporabljajo, je še vedno veliko neraziskanih parametrov, s katerimi lahko spreminjamo lastnosti nanokompozitov, odpornost proti kemikalijam, trdnost, izboljšanje trajnosti in drugo. Zaščitni premazi so glede razvoja v vzponu, s spreminjanjem vsebnosti dolčenih komponent se pri nanokompozitih izboljšajo mehanske lastnosti, zmanjša se prepustnost plinov, lažje se reciklira, slabše gori in je bolj kemijsko odporen.

Z Instituta "Jožef Stefan" so na predavanjih sodelovali tudi vodje kar osmih od več kot dvajsetih različnih odsekov Instituta. Paleta tem, ki so jih



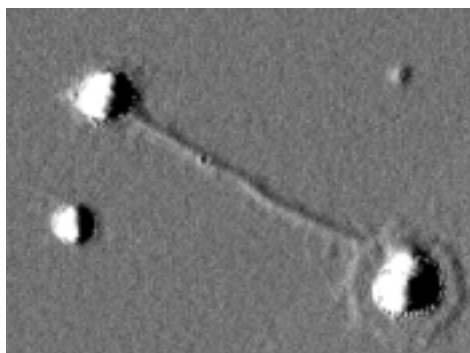
Slika 1: Nanožičke med živčnimi celicami (vir Technology Review)

predstavili, pa je bila zelo široka – od nanomaterialov, kvazikristalov, elastomerov do tehnologij za obdelavo in karakterizacijo površin sodobnih materialov, elektronske, inženirske in biokeramike, nanostrukturnih prevlek in procesiranja keramike, intermetalnih zlitin, magnetnih materialov, tankih plasti in nanožičk.

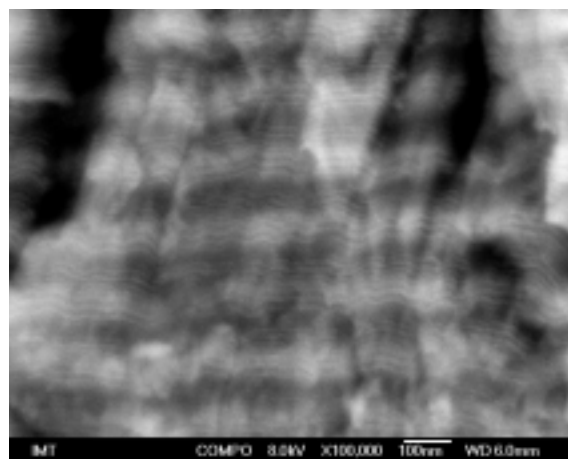
Materiali so danes ključni za oblikovanje izboljšanih ali novih funkcij določenega izdelka; tako lahko da nova lastnost materiala izdelku tudi novo funkcionalnost, lahko ga bistveno poceni ali sploh v osnovi omogoči nov izdelek.

"Informacije so na posvetu potekale v dveh smereh: informacije o temeljnih in aplikativnih raziskavah od institucij znanja proti industrijskim uporabnikom ter informacije o aplikativnih razvojnih problemih in potrebah od podjetij proti institucijam znanja," je zagotovil Jožef Perne, direktor Tehnološkega centra SEMTO. "Udeleženci so tako dobili celovit pregled na področju temeljnih raziskav, aplikativnih raziskav in razvoja materialov, kot tudi pregled potreb za aplikacije v izdelkih."

"Pomembno je, da predstavniki raziskovalnih institucij in univerz ter gospodarstva med seboj sodelujemo, kajti le tako bomo lahko še uspešnejši," je v uvodnem nagovoru povedala prof. dr. Marija Kosec, vodja Centra odličnosti Materiali za elektroniko



Slika 2: Dve zlati nanokroglici, povezani z nanožičko MOSI (vir IJS)



Slika 3: Večplastno prevleko CrN/TiAlN (na sliki) so naredili v Centru za trde prevleke na Institutu "Jožef Stefan", kjer sodelujejo z več kot 150 industrijskimi partnerji iz Slovenije in tujine. Večplastne prevleke so primerne za različna področja uporabe, saj imajo v splošnem večjo trdoto in so bolj žilave od enoplastnih prevlek.



Slika 4: Nekateri nanostrukturirani materiali so pogosto že ob sintezi urejeni v obliki nanocevk in nanožic, ki se končajo kot atomske ostre konice. Le-te omogočajo hladno emisijo elektronov v zmerno močnem električnem polju, kar lahko uporabimo v vrsti elektronsko optičnih naprav. Na zgornji sliki je vakuumsko diodna celica za meritev in opazovanje kotne porazdelitve emitiranega toka (naredili so jo v Odseku za tehnologijo površin in optoelektroniko na Institutu "Jožef Stefan" v sodelovanju s podjetjem LPKF), ki izhaja iz anorganskih nanocevk, sintetiziranih na IJS. Na spodnji sliki je vzorec elektronov, ki izhajajo iz osamljene nanocevke. Med njo in zaslonom je nameščena fina kovinska mrežica. Strukturo dodatne slike povzročijo sipani in odbiti sekundarni elektroni, ki izhajajo iz mrežice.

naslednje generacije ter drugih prihajajočih tehnologij. "In še nekaj je: srečanje prihaja ravno ob pravem času, kajti čez dober mesec se odpira 7. okvirni program, kjer so materiali posebna prioriteta, svoje mesto pa bodo našli tudi v informacijskih tehnologijah, v energetiki, aeronavtiki in še drugje. Prav v teh dveh dneh smo predstavili stanje in možnosti nadaljnjega razvoja na področju naprednih materialov in s tem tudi možnosti za umestitev v evropske projekte", je še dejala prof. dr. Koščeva.

Zavedanje o pomenu materialov v vsakdanjem življenju, v industrijskih izdelkih, v tehnoloških procesih, v medicini je relativno novo, a vse bolj izrazito. Danes najdemo na primer keramiko v vsakem gospodinjstvu, saj so keramični deli vgrajeni v vsaki električni in elektronski napravi, najdemo jo v avtomobilih, kjer poleg drugih delov kot senzor kontrolira vžig motorja, najdemo jo v vesoljski tehniki, kjer se izkorišča njena izjemna obstojnost pri visokih

temperaturah in odpornost proti obrabi. Brez keramičnih materialov ne bi bilo vesoljskih plovil. S težnjo po vse večji kvaliteti življenja se hitro prebijajo tudi v medicino, bodisi kot implantati (keramika lahko nadomešča kosti, zobe) bodisi jih uporabljajo v medicinskih diagnostičnih in terapevtskih aparatih. Za zdaj so to predvsem tisti na osnovi ultrazvoka, ki ga generirajo piezokeramični pretvorniki in z njimi opazujemo notranje organe, kmalu bomo lahko tudi kožo, oči.

Splošna ugotovitev je bila, da je bilo to prvo srečanje raziskovalcev z institutov in strokovnjakov iz industrije zelo uspešno in koristno. Zato upamo, da bo podobnih srečanj v prihodnje več.

dr. Špela Stres
Institut "Jožef Stefan"
Jamova 39
1000 Ljubljana

PLINI ZA PRIPRAVO VAKUUMSKIH (PVD) TANKIH PLASTI

V napravah za nanos tankih plasti potrebujemo zelo čiste pline v fazah čiščenja oz. jedkanja, nanašanja in ohlajanja vakuumске komore. Te pline imenujemo reaktivne, če pride med njimi in materialom, ki ga nanašamo, do kemijske reakcije (npr. dušik pri pripravi TiN). Če pa tak plin uporabimo samo za vzdrževanje razelektritve ali za jedkanje, potem govorimo o inertnem plinu. Večina inertnih plinov je iz VII. skupine periodnega sistema elementov.

Najbolj pomembni lastnosti inertnih plinov sta atomska masa in ionizacijski potencial (slika 1). Če pa se plin uporablja za hlajenje, je pomembna lastnost tudi njihova toplotna prevodnost (slika 1). Če za ustvarjanje vakuumа uporabljamo kriogensko črpalko, potem je pomembna lastnost plinov tudi njihovo tališče. Kriogenska črpalka ima namreč manjšo hitrost črpanja za pline z nižjim tališčem.

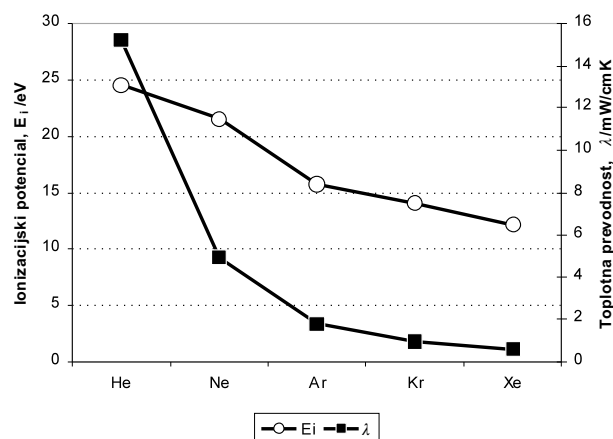
V VII. skupini periodnega sistema se nahajajo helij (2), neon (10), argon (18), kripton (36), ksenon (54) in radon (86). Številke v oklepaju so atomske število. Tako kot pri drugih skupinah periodnega sistema se elementi, ki imajo višje atomsko število, redkeje nahajajo na Zemlji in so zato bistveno dražji.

V splošnem lahko vse pline iz te skupine uporabimo za vzdrževanje razelektritve. Vendar je atomsko število helija in neona prenizko, da bi prišlo do znatne interakcije (prenosa gibalne količine) ob trku s površinami trdnih snovi (tarčo). Atomi elementov z višjim atomskim številom so bistveno bolj učinkoviti (slika 1)^(2,3). Zaradi relativno nizke cene se za naprševanje najpogosteje uporablja argon. Če je ekonomsko upravičeno, se v nekaterih primerih

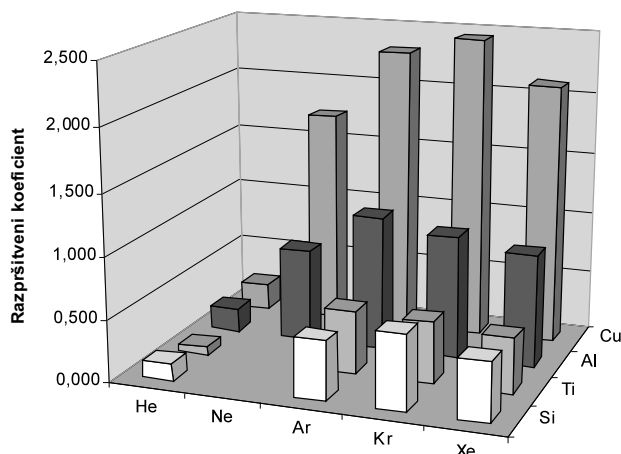
uporablja tudi kripton, ki ga lažje ioniziramo in ker ima večji koeficient razprševanja.

Že najmanjša prisotnost nečistoč ali drugih elementov v inertnem ali reaktivnem plinu vpliva na oprijemljivost, barvo ali druge lastnosti vakuumskih tankih plasti. Zato moramo uporabiti zelo čiste pline (npr. 99,99 %). Čistočo plinov pogosto zapisujemo z dvema številčkama. Prva pove število devetk, druga, ki jo zapišemo za piko, pa je prva številka v volumenskem deležu, ki ni devetka. Zgled: Ar s čistočo 99,995 % ima oznako 4.5, če pa je čistoča 99,999, ima oznako 5.0. Pred uporabo lahko inertne pline, vodik in dušik dodatno očistimo tako, da jih vodimo skozi komoro, v kateri je segreta plošča iz urana, titana ali bakra. Na vročih kovinskih površinah pride do reakcije kisika in vodne pare. Nekatere pline lahko očistimo tudi tako, da difundirajo skozi vročo membrano. Tako lahko vodik očistimo z difuzijo skozi platino, kisik z difuzijo skozi srebro, helij pa z difuzijo skozi kremen.

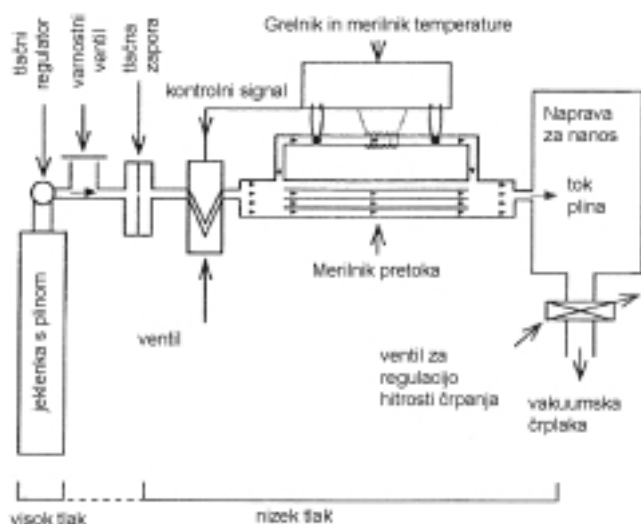
V napravah za nanos tankih plasti uporabljamo pline, ki so v jeklenkah pri visokih tlakih (do 200 bar). Plin iz jeklenke gre skozi tlačni regulator, ki zmanjša pritisk na 1 bar do 10 bar. Plin nato potuje skozi merilnik pretoka. Ti v splošnem ne zdržijo tlačne razlike, ki nastane v primeru, če odpove tlačni regulator. Da bi preprečili tlačno preobremenitev komponent, moramo za tlačnim regulatorjem vgraditi varnostni ventil in tlačno zaporo (slika 3)⁽⁴⁾. Če odpove tlačni regulator, potem tlačna zapora zmanjša pretok plina v smeri proti merilniku pretoka, zaradi velikega pritiska v prostoru pred njo, pa se odpre varnostni ventil. Z



Slika 1: Ionizacijski potencial in toplotna prevodnost inertnih plinov



Slika 2: Razpršitveni koeficienti ionov inertnih plinov pri obdelavi Si, Ti, Al in Cu



Slika 3: Varna priključitev plina na vakuumski sistem⁽⁴⁾

vidika varnosti je zelo pomembno, da so jeklenke pritrjene na zid, saj bi se v primeru padca lahko odtrgal tlačni regulator, jeklenka pa bi se spremenila v projektil.

Še tako čist plin nam nič ne pomaga, če je posoda s plinom napačno priključena na vakuumsko napravo ali če zamenjava ni narejena korektno. Ko novo jeklenko priključimo na vakuumsko napravo in odpremo ventil, potem se zrak iz priključne cevi pomeša s čistim plinom iz jeklenke. V primeru nove in polne jeklenke se koncentracija nečistoč poveča za največ 1 ppm. Če pa jeklenko večkrat menjamo ali če uporabimo delno izpraznjeno jeklenko, lahko nastane znatna kontaminacija. Zato je nujno potrebno, da po vsaki zamenjavi priključno cev izčrpamo, preden odpremo ventil na jeklenki.

Vse to velja tudi za reaktivne pline. Dušik lahko uporabimo kot reaktivni plin med nanašanjem tanke plasti, lahko pa tudi kot inerten plin za hlajenje. Za gorljive pline ni potrebno, da bi bili tako čisti kot inertni. Za metan je npr. čistoča 3.5 povsem zadostna. Vendar pa moramo pri uporabi gorljivih plinov poskrbeti za posebne varnostne ukrepe, da bi preprečili eksplozijo naprave.

Eksplozija lahko nastane, če priključna cev pušča, plin, ki uhaja, pa se akumulira v delovnem prostoru. Glavni ukrep za zmanjšanje nevarnosti eksplozije je dobro prezračevanje prostora, kjer je jeklenka. Le-ta mora biti v omari, ki je ognjevarna in ki je stalno prezračevana (DIN EN 14470-2). Za dodatno varnost je priporočljivo, da je jeklenka v oklepu, ki ga moramo tudi prezračevati.

Na izhodni strani črpalke, kjer izhajajo plini iz vakuumske posode, so glede varnosti potrebne podobne zahteve kot na vhodni strani. Tudi na tej strani moramo zagotoviti dobro prezračevanje ali pa speljati izhodne pline skozi vodo v posodi in nato v ozračje. Dodatni varnostni ukrep je vgradnja senzorja, ki samodejno zapre dovod plina, če zazna puščanje.

Pri vakuumskih postopkih nanašanja tankih plasti v izjemnih primerih uporabljamo tudi nekatere strupene pline. Primer je npr. reaktivno nanašanje boridov ali silicidov, kjer kot izvir borovih atomov uporabimo pare diborana (B_2H_6), kot izvir silicija pa silan (SiH_4). Oba plina sta strupena in eksplozivna. Tudi pri plazemskem čiščenju ali jedkanju zelo pogosto uporabljamo potencialno strupene in korozivne pline. Primer je CCl_4 , ki se ob prisotnosti vodne pare spremeni v fosgen ($COCl_2$), ki je izjemno strupen bojni plin. Le-ta se pri črpanju lahko ustvarja in akumulira v olju vakuumske predčrpalke. Izhodne pline moramo razgraditi termično (npr. piroliza) ali kemijsko. Za dovod nevarnih plinov moramo uporabiti cevi z dvojno steno.

Da bi povečali hitrost ohlajanja po končanem nanosu tanke plasti spustimo v vakuumsko posodo inerten plin. Največji dovoljeni tlak plina, ki ga dopuščajo vakuumske posode, je 1 bar. Ta tlak določa hladilni učinek plina, saj je prenos toplote zaradi konvekcije sorazmeren s tlakom. V nekaterih vakuumskih sistemih obstaja možnost, da hladilni plin kroži, kar poveča hitrost ohlajanja.

Najcenejši inerten plin za ohlajanje je dušik, ki pa ima srednje veliko toplotno prevodnost. Toplotna prevodnost vodika je desetkrat večja od dušika, vendar je eksploziven. Če potrebujemo hitro ohlajanje, moramo uporabiti helij, ki pa je bistveno dražji od dušika.

LITERATURA

¹<http://www.apsidium.com/elements/054.htm>

²<http://www.4pvd.de/4pvdNews26gb.pdf>

³Sputtering by Particle Bombardment, Ed. R. Behrisch, Springer Verlag, Berlin, 1981, 166-190

⁴Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, D. M. Mattox, Noyes Publications, 1998

dr. Peter Panjan
Institut "Jožef Stefan"
Jamova 39
1000 Ljubljana

NAVODILA AVTORJEM

NAVODILA AVTORJEM PRI PRIPRAVI PRISPEVKOV ZA STROKOVNI ČASOPIS VAKUUMIST

Vakuumist je časopis, ki objavlja originalne in pregledne članke s področja vakuumskih znanosti, tehnike in tehnologij, vakuumske metalurgije, tankih plasti, fizike površin trdnih snovi in nanostruktur, analitike površin, fizike plazme in zgodovine vakuumske znanosti in tehnologij. Znanstveni in strokovni prispevki so recenzirani. Prispevki morajo biti napisani v slovenskem jeziku, naslov članka in povzetek pa v slovenskem in angleškem jeziku. Če je članek sprejet (po recenzentovem in lektorjevem pregledu), avtor vrne popravljen članek uredniku Vakuumista.

PRIPRAVA ROKOPISA

Prispevek naj bo napisan v enem od bolj razširjenih urejevalnikov besedil (npr. Word for Windows) ali temu kompatibilnem programu (tekst, urejen s programom LaTeX, ni zaželen). Če avtor uporablja kakšen drug urejevalnik, naj ga konvertira v navaden format ASCII. Celoten rokopis članka obsega:

- naslov članka (v slovenskem in angleškem jeziku)
- podatke o avtorjih (ime in priimek, brez akademskega naziva, ime in naslov institucije)
- povzetek v slovenskem in angleškem jeziku (največ 250 besed)
- besedilo članka v skladu s shemo IMRAD (uvod, eksperimentalne metode, rezultati in diskusija, sklepi)
- slike (risbe, fotografije), ki naj bodo priložene posebej
- tabele, preglednice z nadnapisi
- podnapise k slikam
- pregled literature

Obvezna je raba merskih enot, ki jih določa Odredba o merskih enotah (Ur. l. RS št. 26/01), tj. enot mednarodnega sistema SI (glej prispevek: P. Glavič: Mednarodni standardi – Veličine in enote (ISO 31-0 do 31-13), Vakuumist, **22** (2002) 4, 17–22). Enačbe se označujejo ob desni strani besedila s tekočo številko v okroglih oklepajih.

ILUSTRACIJE

Črno-bele ilustracije (risbe, diagrami, fotografije) morajo biti oštevilčene, priložene posebej. Črkovne oznake na diagramu naj bodo take velikosti, da je po pomanjšavi na širino enega stolpca (7,9 cm) velikost števil in (velikih) črk od 1,2 do 2,4 mm. Diagrami in slike naj bodo v formatih BMP, TIF ali JPG. Za risanje naj bo po možnosti uporabljen CorelDraw. Kvaliteta slikovnega gradiva mora biti dovolj visoka, da omogoča neposredno reprodukcijo.

LITERATURA

Literaturni viri so zbrani na koncu članka in so oštevilčeni po vrstnem redu, kakor se pojavijo v članku. Vsak vir, ki mora biti popoln (okrajšave ibid., idem., et al., etc. niso dovoljene), mora biti opremljen s podatki, ki omogočajo bralcu, da ga poišče. Knjige, periodične publikacije, deli knjig, članki v periodičnih publikacijah, patenti, članki in drugi prispevki v elektronski obliki morajo biti citirani kot npr.

- Monografije
Zgled: S. Južnič, Zgodovina raziskovanja vakuuma in vakuumskih tehnik, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Ljubljana, 2004, str. 203
- Članki v periodičnih publikacijah
Zgled: M. Čekada, P. Panjan, Vakuumist, **24** (2004) 4, 4–10
- Prispevki v zbornikih posvetovanj
Zgled: P. Panjan: Novejši razvoj PVD trdnih zaščitnih prevlek za zaščito orodij in strojnih delov, Zbornik posvetovanja Orodjarstvo, Portorož, 2003, 121–124
- Članki in drugi prispevki v elektronski obliki
Zgled: P. Panjan, M. Čekada, B. Navinšek. Surface and Coatings Technology [online], 174–175, 2003, 55–62, dosegljivo na domači strani: <http://www.sciencedirect.com/>

AVTORSKE PRAVICE

Avtorji prispevka so v celoti odgovorni za vsebino objavljenega sestavka. Z objavo preidejo avtorske pravice na izdajatelja. Pri morebitnih kasnejših objavah mora biti periodična publikacija Vakuumist navedena kot vir.

Uredništvo periodične publikacije Vakuumist:

- odloča o sprejemu članka za objavo
- poskrbi za strokovne ocene in morebitne predloge za krajšanje ali izpopolnitev prispevka
- poskrbi za jezikovne popravke

Rokopise pošljite na naslov:

dr. Peter Panjan
glavni in odgovorni urednik Vakuumista
Institut "Jožef Stefan"
Jamova 39
1000 Ljubljana, Slovenija
elektronska pošta: peter.panjan@ijs.si
tel.: (01) 477 32 78
faks: (01) 251 93 85

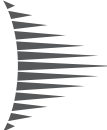


ActiveLine

Total pressure measurement in a vacuum



► Large variety ► Easy integration ► Cost effective

PFEIFFER  **VACUUM**

Pfeiffer Vacuum Austria GmbH

Diefenbachgasse 35 · A-1150 Wien · Phone +43-1-8941-704 · Fax +43-1-8941-707
office@pfeiffer-vacuum.at

SCAN d.o.o. Preddvor

Breg ob Kokri 7 · SI-4205 Preddvor · Phone +386-4-2750200 · Fax +386-4-2750420 · scan@siol.net

www.pfeiffer-vacuum.net