

ICONSISMUS XI



Fig. IV.

VAKUUMIST

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



Fig. II.

44 let
DVTS

LJUBLJANA, OKTOBER 2003

ISSN 0351-9716

LETNIK 23, ŠT. 2-3 2003

UDK 533.5.62:539.2:669-982

Vacuum is nothing, but everything to us



Leak detection
made easy

QualityTest™

- ▶ On-Screen prompts for easy operation
- ▶ Push-button self-calibration
- ▶ Highest sensitivity $5 \cdot 10^{-12}$ mbar l/s

Set the standard in
benchtop gas analysis

OmniStar™

- ▶ Turnkey operation
- ▶ Compact mass spec system
- ▶ PPB detection limits



PFEIFFER  **VACUUM**

Pfeiffer Vacuum Austria GmbH

Phone +43 (0) 1 8941 704 · Fax +43 (0) 1 8941 707 · office@pfeiffer-vacuum.at · www.pfeiffer-vacuum.at

SCAN d.o.o. Slovenija

Phone +386 (0) 4-27 50 200 Fax +386 (0) 4-27 50 540 · scan@siol.net · www.scan.si

VSEBINA

ČLANKI

* Kvizikristalne tanke plasti (Miha Čekada, Peter Panjan, Janez Dolinšek)	4
* Uporaba vakuumu v medicini (Jože Gasperič)	8
* PVD-prevleke za zaščito orodij za suho obdelavo (Peter Panjan)	13
* Magnetronsko nanašanje volframskih plasti (Andrej Furlan, Nikola Radić)	17
* Kako je vakuum prišel na Kitajsko (Ob 300-letnici Hallersteinovega rojstva) (Stanislav Južnič)	23
* Turjaški knez, prvi kranjski vakuumist (ob 350-letnici Guerickejevega poskusa z magdeburškima polkroglama) (Stanislav Južnič)	31

NASVETI

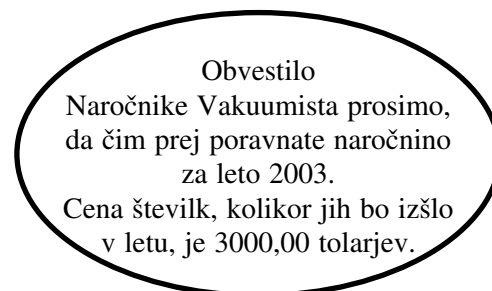
* Priprava atomsko čistih površin (Rok Žitko)	43
* Določanje debeline tankih plasti iz meritve profila stopnice (Miha Čekada)	46

DRUŠTVENE NOVICE

* Deseti mednarodni znanstveni sestanek Vakuumska znanost in tehnika (Andrej Pregelj)	49
* Seja mednarodne zveze IUVSTA (International union for vacuum science, technique and applications) v Dubrovniku	50

NOVA KNJIGA

* Stanislav Južnič, Avguštin Hallerstein, kitajski astronom iz Mengša	50
---	----



SPONZORJI VAKUUMISTA:

- **Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport, Urad za znanost**
- **Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport, Urad za šolstvo**
- **PFEIFFER Vacuum Austria GmbH**

VAKUUMIST

Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije

Glavni in odgovorni urednik: dr. Peter Panjan

Uredniški odbor: mag. Andrej Demšar, dr. Jože Gasperič (urednik za področje 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. Miha Čekada, dr. Boris Orel, mag. Andrej Pregelj, dr. Janez Šetina 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/>

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

KVAZIKRISTALNE TANKE PLASTI

Miha Čekada, Peter Panjan, Janez Dolinšek

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

V prispevku so najprej na kratko povzete osnove simetrij v trdnih snoveh, čemur sledi predstavitev kvazikristalnih snovi. Opisane so njihove osnovne fizikalno-kemijske lastnosti, kot so ozko koncentracijsko območje, slaba električna prevodnost, visoka trdota, slabo omakanje površin itd. Podrobneje so predstavljene metode nanosa tankoplastnih kvazikristalov, in sicer nanos iz zmesne in kompozitne tarče, sočasni nanos iz več tarč ter nanos večplastne strukture z naknadnim pregrevanjem. Na koncu so naštetje še nekatere značilne lastnosti tankoplastnih kvazikristalov.

Quasicrystalline thin films

ABSTRACT

This paper starts with a short summary of symetries in solid state, followed by a presentation of quasicrystalline materials. Their basic physical and chemical properties are described, such as narrow concentration range, poor electrical conductivity, high hardness, poor wetting of the surfaces etc. Deposition methods for thin film quasicrystals are described in greater detail: deposition from compound and composite target, simultaneous deposition from more targets and deposition of multilayer structure with successive annealing. At the end, typical properties of thin film quasicrystals are added.

1 UVOD

Osnovni pojem kristalografije je Bravaisova mreža. Izmed več ekvivalentnih definicij omenimo tisto, po kateri je Bravaisova mreža množica točk v prostoru, ki jih lahko popišemo z linearno kombinacijo treh neodvisnih vektorjev \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 in \mathbf{a}_3 :

$$\mathbf{R} = m_1 \mathbf{a}_1 + m_2 \mathbf{a}_2 + m_3 \mathbf{a}_3$$

kjer so m_1 , m_2 in m_3 cela števila. S preprostim sklepanjem se pokaže, da ima Bravaisova mreža translacijsko in rotacijsko simetrijo, kar pomeni, da se pri translaciji za določen vektor in pri rotaciji za določen kot mreža preslika samo vase. Slednja opredelitev zahteva, da mora določeno število rotacij (n) popisati polni kot 360° , tako da govorimo o n -števni osi. Še eno lastnost je treba omeniti, to je red dolgega dosega – lego vsakega atoma v prostoru lahko vnaprej predpišemo, kar sledi že iz same definicije Bravaisove mreže.

Izkaže pa se, da lahko translacijsko simetrijo ohranimo le pri 1-, 2-, 3-, 4- in 6-števni osi. Enoštevna os je trivialna, saj preslika mrežo samo vase, dvoštevna os lahko predstavimo tudi z zrcaljenji, ostale osi pa si v ravnini preprosto predstavimo s pravilnimi liki: trištevno os z enakostraničnimi trikotniki, štirištevno os s kvadrati in šestštevno os s pravilnimi šestkotniki. Z vsakim od teh likov lahko zapolnimo ravnino brez prekrivanja ali vmesnih

praznin. S pravilnimi petkotniki ravnine ne moremo v celoti pokriti, saj nam vmes ostanejo praznine, pri sedemkotnikih pa pride do prekrivanja (slika 1). Petštevno ter sedem- ali večštevne simetrije imenujemo prepovedane simetrije, ker pri njih ni invariantnosti pri translaciji, torej ne tvorijo Bravaisove mreže.

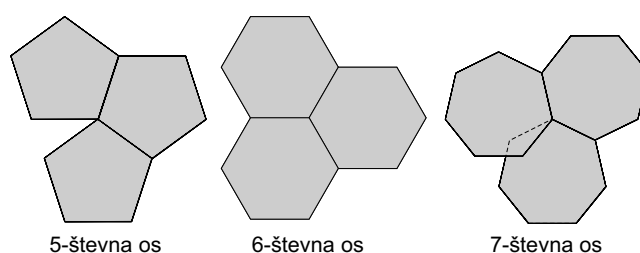
Vse kristalinične snovi v naravi sodijo v eno od Bravaisovih mrež, torej imajo eno ali več dovoljenih rotacijskih simetrij (govorimo seveda o idealnih kristalih). Posameznim ravninam in smerem pripišemo Millerjeve indekse, vpeljemo recipročno mrežo in s pomočjo uklona rekonstruiramo lege atomov. Amorfne snovi (npr. stekla) nimajo niti translacijske niti rotacijske simetrije, nimajo reda dolgega dosega, pri uklonu ne dajejo interference in jim ne moremo pripisati Millerjevih indeksov.

Leta 1984⁽¹⁾ pa je bila objavljena prva uklonska slika materiala s prepovedano simetrijo (5- ter 10-števna os), in sicer hitro strjene zlitine $\text{Al}_{86}\text{Mn}_{14}$. Uklonski vrhovi so bili ostri in jasno izraženi, kar je dokazovalo obstoj reda dolgega dosega. Naknadne raziskave so pokazale, da gre za kvaziperiodično strukturo. Osnovne celice ne moremo predpisati, prav tako ne troštevni Millerjevih indeksov. Mreža nima translacijske simetrije, saj jo glede na prepovedano rotacijsko simetrijo ne more imeti, ima pa red dolgega dosega. Za takšne strukture se je prijelo ime "kvazikristali" in predstavljajo nekakšno vmesno stopnjo v urejenosti snovi:

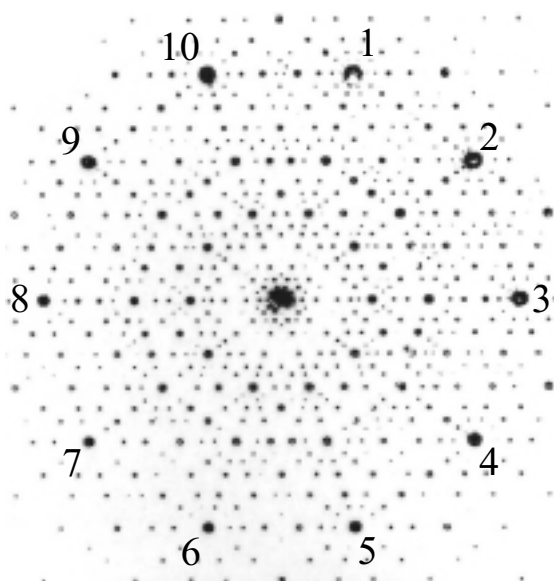
- kristali (red dolgega dosega in translacijska simetrija)
- kvazikristali (red dolgega dosega, a brez translacijske simetrije)
- amorfne snovi (brez reda dolgega dosega in brez translacijske simetrije)

2 LASTNOSTI KVAZIKRISTALOV

Tri leta po prvi objavi so odkrili prvo stabilno kvazikristalno fazo, kar je odprlo možnosti prido-



Slika 1: Ponazoritev 5-, 6- in 7-števne osi v ravnini



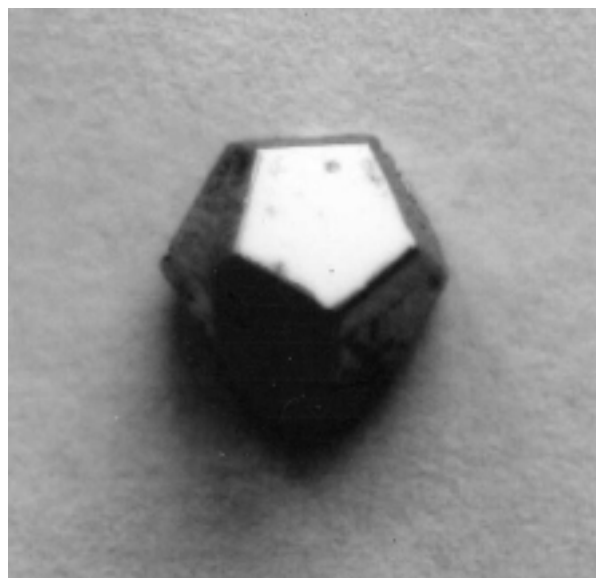
Slika 2: Značilna uklonska slika kvazikristala z desetštevno (prepovedano) simetrijo

bivanja s klasičnimi metalurškimi postopki. Danes – niti dvajset let še ni minilo od odkrita – je poznanih že čez 50 različnih kvazikristalnih faz. Največkrat gre za ternarne ali kvarternarne spojine na osnovi aluminija z dodanimi nekaterimi prehodnimi kovinami (baker, železo, kobalt, nikelj, krom). Vsi ti elementi so poceni in široko dostopni, kar močno poenostavi raziskovalno delo in kasnejšo uporabo. Poznanih je tudi nekaj faz na osnovi titana in redkih zemelj, pred tremi leti pa so odkrili tudi prve stabilne binarne faze (Cd-Ca in Cd-Yb) ⁽²⁾.

Glede na to, da kvazikristalne faze sestavljajo kovinski elementi, bi pričakovali kovinske lastnosti, podobno kot pri običajnih intermetalnih fazah (npr. Ni₃Al, NiAl, Ni₂Al₃ itd.). Vendar so kvazikristali po lastnostih bolj podobni polprevodniškimi ali celo keramičnim materialom. Poglejmo si nekoliko podrobneje posamezne fizikalne in kemijske lastnosti.

Najbolj presenetljiva lastnost je slaba električna prevodnost, ki je za nekaj velikostnih redov nižja od prevodnosti posameznih kovin, ki sestavljajo kvazikristalno fazo. V večini primerov je temperaturni koeficient upornosti negativen in v tem pogledu lahko govorimo o polprevodniškem karakterju kvazikristalov. Tudi toplotna prevodnost je nizka in bolj primerljiva z vrednostmi za keramične materiale kot za kovinske.

V primerjavi z relativno mehkiimi in duktilnimi kovinami se kvazikristalne snovi odlikujejo po krhkosti in sorazmerno visoki trdoti (do 10 GPa), kar je sicer značilno za keramične materiale ⁽³⁾. Toda pri povišanih temperaturah (okoli 500 °C) pa pride do prehoda v superplastično stanje, česar pri keramičnih materialih ni. Zaradi nizke toplotne prevodnosti se kaže potencialna uporaba kvazikristalov za toplotne



Slika 3: "Monokvazikristal" AlGaPdMn (širina slike 5 cm)

bariere. Superplastičnost pri visokih temperaturah to uporabnost še poveča, saj na ta način pride do kompenzacije napetosti zaradi različnih toplotnih raztezkov. Opazili so tudi povečanje duktilnosti po mehanski obremenitvi, in sicer pri testu razenja ⁽⁴⁾. Spremljajoči pojavi so tudi fazna transformacija v kubično fazo, nastanek dislokacij, dvojčenja in novih kristalnih mej.

Od površinskih lastnosti je vsekakor treba omeniti slabo omakanje vode (oz. drugih polarnih kapljev) tako v primerjavi s kovinami kot tudi z oksidi. Oma-kanje vode na poliranih kvazikristalih je primerljivo s teflonom ⁽⁵⁾. Poročajo tudi o nizkem koeficientu trenja. V kombinaciji z visoko trdoto lahko pričakujemo perspektivno uporabo kot zaščitne prevleke.

Kvazikristali se tudi odlikujejo po dobri obstojnosti proti oksidaciji in koroziji. V večini kvazikristalnih faz je namreč veliko aluminija, ki difundira proti površini in tvori nekaj nm debelo pasivacijsko plast Al₂O₃. Plast je dovolj tanka, da ne poslabša lastnosti kvazikristalnega materiala. Takšna zaščitna plast ostane obstojna do 400 °C, pri višjih temperaturah pa pride do hitre rasti debeline oksidne plasti, ki je povezana s segregacijo aluminija in tvorbo novih faz, ki niso kvazikristalne ⁽⁶⁾. Razumevanje difuzijskih procesov je še posebej pomembno pri rasti kvazikristalnih tankih plasti preko vmesne večplastne strukture.

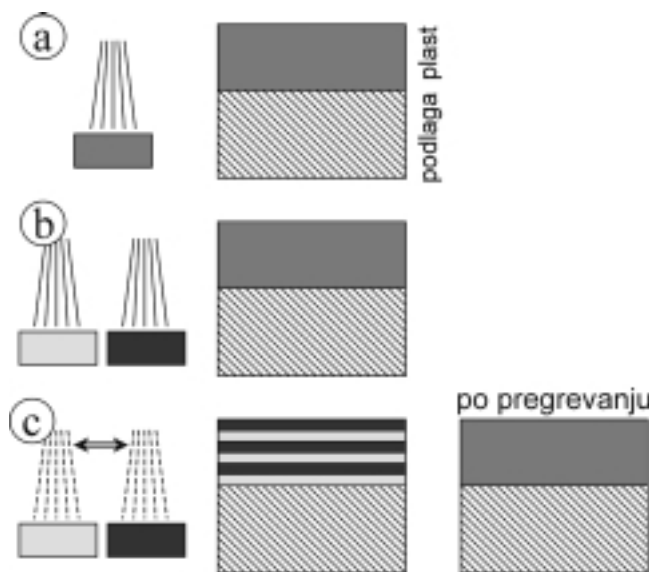
Pri pripravi kvazikristalov je treba zagotoviti natančno atomsko razmerje, saj je koncentracijsko območje, kjer nastaja kvazikristalna faza, večinoma ozko. Dodajanje majhnih koncentracij dodatnih elementov lahko močno vpliva na določene lastnosti. Običajna metoda priprave je ulivanje v inertni

atmosferi, v uporabi pa je tudi sintranje, metoda Czochralskega za sintezo monokristalov itd.

3 PRIPRAVA KVAZIKRISTALNIH TANKIH PLASTI

Poglejmo si tri skupine postopkov, kako lahko pripravimo tanko plast kvazikristalov:

- 1) S konvencionalnimi postopki (ulivanje, sintranje ipd.) pripravimo zlitinsko tarčo z želeno sestavo (slika 4a). Primerni so takšni načini uparjitve, kjer je atomsko razmerje kovinskih elementov v parni fazi enako razmerju v tarči ^(7,8,9): naprševanje, pulzno naparevanje z laserjem, plazemski sprej postopki. Klasični postopki naparevanja (uporovno, z elektronskim curkom, s katodnim lokom) niso primerni, ker zaradi visoke temperature tarče pride do segregacije elementov in se atomsko razmerje uparjenih plinov spreminja s časom. Ta pristop je najbolj direkten, povezan pa je s težavami zaradi hlajenja tarče (ki ima slabo toplotno prevodnost) in nevarnostjo nastanka razpok v njej.
- 2) Uporabimo lahko ločene tarče, za vsako kovino po eno (slika 4b). Izbira načinov uparjitve je večja, vendar mora imeti sistem za nanos možnost sočasnega nanašanja iz več tarč ⁽¹⁰⁾. Hitrost nanašanja posameznih komponent moramo natančno kontrolirati, da dobimo zahtevano atomsko razmerje v plasti. Predhodno je namreč treba umeriti hitrost nanosa posameznih komponent. Soroden postopek je uporaba segmentne tarče ⁽¹¹⁾, npr. aluminijeva

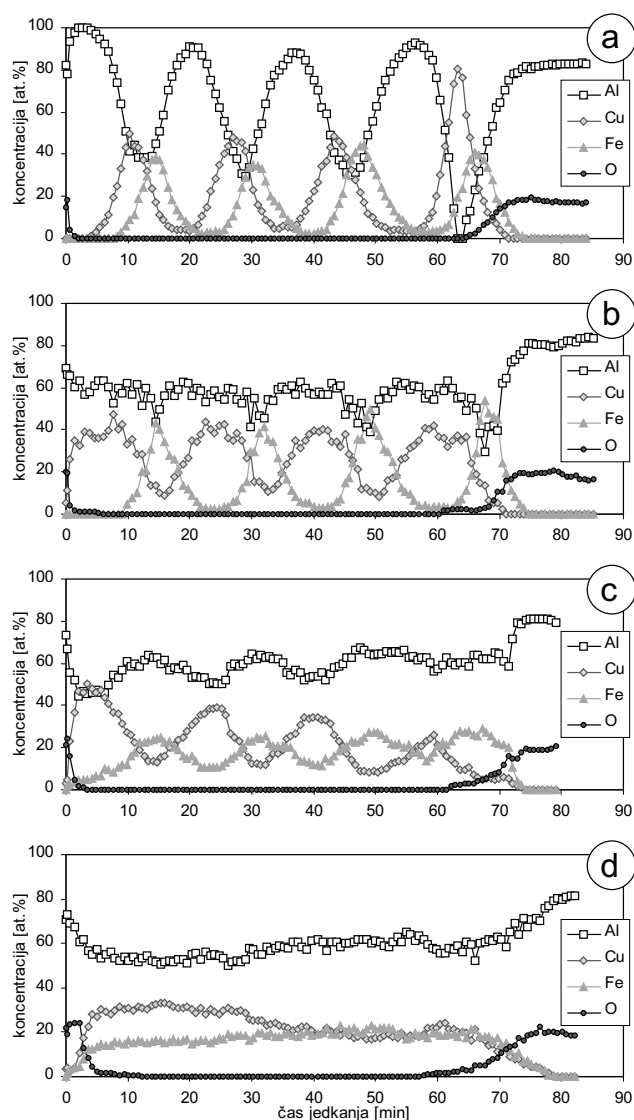


Slika 4: Tri skupine postopkov nanosa kvazikristalnih tankih plasti: a) nanos iz zlitinske tarče, b) sočasni nanos iz ločenih kovinskih tarč (zaradi preglednosti sta narisani le dve tarči), c) nanos večplastne prevleke iz ločenih kovinskih tarč in naknadno pregrevanje

tarča z vgrajenimi segmenti bakra in železa zagotavlja nanos plasti Al-Cu-Fe.

- 3) Tretja skupina postopkov poteka v dveh fazah: najprej nanesemo večplastno strukturo posameznih elementov, nato pa jo pregrejemo, da pride do homogenizacije (slika 4c) ⁽¹²⁾. Tudi tu je široka izbira načinov uparjitve, sistem pa mora imeti možnost in-situ menjave tarč (ali preklapljanje iz ene tarče na drugo). Ker zadovoljivo premešanje dosežemo šele pri temperaturah okoli 500 °C, se lahko pojavijo težave zaradi mešanja s podlago in morebitnih sprememb same podlage. Pregrevanje mora potekati v vakuumu ali v zaščitni atmosferi, da preprečimo oksidacijo.

Medtem ko pri prvih dveh skupinah postopkov kvazikristalna tanka plast raste direktno na podlago, pa moramo po nanosu večplastne strukture zagotoviti še primerne pogoje pregrevanja. Temperatura mora



Slika 5: AES globinski profili različnih stopenj pregrevanja večplastne strukture Al/Cu/Fe: a) po nanosu, b) 350 °C, c) 500 °C, d) 600 °C

biti dovolj visoka, da pride do difuzije posameznih elementov in s tem homogenizacije plasti (slika 5), ne sme pa presegati tališča katerega od elementov (ponavadi gre za aluminij pri 660 °C). Poleg temperature in časa pregrevanja je pomembna še debelina in sekvenca posameznih plasti.

Na sistemu Al-Cu-Fe si pogledjmo vrstni red pojavljanja faz pri počasnem naraščanju temperature. Že pri 200 °C zreagirata baker in aluminij v eno od binarnih intermetalnih faz (AlCu, Al₂Cu ali AlCu₃). Pri približno 300 °C nastanejo še binarne faze Al-Fe, nad 400 °C pa se pojavijo prve ternarne faze ω-Al₇Cu₂Fe in β-Al(Cu,Fe). Kvazikristalna faza se pojavi šele pri okoli 600 °C⁽¹²⁾.

4 LASTNOSTI KVAZIKRISTALNIH TANKIH PLASTI

V tem poglavju se bomo osredotočili na sistem Al-Cu-Fe, saj je danes med najbolj raziskanimi. Tam, kjer lastnosti drugih kvazikristalnih faz posebej izstopajo, bomo to navedli v tekstu.

Kot rečeno, nastaja kvazikristalna faza le v ozkem koncentracijskem območju. Poleg tega pa pogosto v rentgenskem spektru najdemo še vrhove kristalnih faz, največkrat β-Al(Cu,Fe). Skupaj najdemo v ravnovesnem ternarnem diagramu Al-Cu-Fe še vrsto drugih binarnih in ternarnih faz (Al-Cu in Al-Fe)⁽¹³⁾. Delež posameznih faz je poleg od sestave odvisen tudi od obdelave materiala (mehanska obdelava, pregrevanje).

Mehanske lastnosti tankih kvazikristalnih plasti so primerljive z masivnimi vzorci: relativno visoka trdota (za AlCuFe 8–10 GPa), nizka lomna žilavost in nizek koeficient trenja. Natančna analizo vpliva različnih parametrov na trenje je bila podana za sistem Al-Ni-Co-Si⁽¹⁴⁾.

Meritve mikrotrdote masivnih vzorcev kažejo na precejšnjo odvisnost od uporabljene obtežitve. Pri dovolj visokih obtežitvah (nad 200 g) pride do pokanja in luščenja materiala zaradi nizke lomne žilavosti⁽³⁾. Kljub relativno visoki trdoti je zaradi nizke lomne žilavosti uporaba kvazikristalnih zaščitnih prevlek omejena. Ena od rešitev je priprava kompozitnih tankih plasti s kvazikristalno in kristalno fazo. Za slednjo lahko uporabimo kar eno od faz iz istega sistema, denimo relativno duktilno fazo AlFe. Dodatek kristalne faze poveča lomno žilavost in abrazijsko obstojnost tanke plasti⁽¹⁵⁾. Poročajo tudi, da dodatek kristalne faze zmanjša koeficient trenja, nima pa znatnega vpliva na mikrotrdoto⁽¹⁶⁾. Nekateri avtorji trdijo nasprotno, da mikrotrdota nekoliko raste z

deležem kvazikristalne faze, opisujejo pa tudi vpliv debeline in poroznosti plasti⁽⁹⁾.

Poročajo o uspešnih testih zaščite titanovih zlitin pred oksidacijo s kvazikristalnimi zaščitnimi prevlekami, in sicer Al-Cu-Fe-Cr⁽¹⁷⁾. Isto prevleko so vpeljali v komercialno proizvodnjo kot zaščito kuhinjskih posod pod zaščiteno znamko Cybernox[®]⁽¹⁸⁾.

5 SKLEP

Kljub poznemu odkritju so osnovne lastnosti kvazikristalov že relativno dobro poznane. Raziskave tankoplastnih kvazikristalov pa so šele pri začetku, saj so objave s tega področja še precej redke. Že nanos kvazikristalnih tankih plasti je povezan z določenimi težavami. Zaradi kombinacije zanimivih, potencialno tehnološko uporabnih lastnosti so raziskave usmerjene v karakterizacijo tankih plasti in primerjavo z že relativno dobro poznanimi lastnostmi masivnih materialov. To je že privedlo do prvih primerov komercialne uporabe.

6 LITERATURA

- ¹D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias, J.W. Cahn, *Phys. Rev. Lett.* **53**(20) (1984) 1951–1953
- ²J.-M. Dubois, *J. Phys: Cond. Mat.* **13** (2001) 7753–7762
- ³K. Mukhopadhyay, G. C. Weatherly, J. D. Embury, *Mat. Sci. Eng.* **A315** (2001) 202–210
- ⁴J.S. Wu, V. Brien, P. Brunet, C. Dong, J. M. Dubois, *Phil. Mag. A* **80**(7) (2000) 1645–1655
- ⁵J.-M. Dubois, *Mat. Sci. Eng.* **294–296** (2000) 4–9
- ⁶M. Gil-Gavaz, D. Rouxel, P. Pigeat, B. Weber, *Phil. Mag. A* **80**(9) (2000) 2083–2097
- ⁷A. Kanjilal, U. Tiwari, R. Chatterjee, *Materials Research Bulletin* **37** (2002) 343–351
- ⁸R. Teghil, L. D'Alessio, M.A. Simone, M. Zaccagnino, D. Ferro, D.J. Sordelet, *Appl. Surf. Sci.* **168** (2000) 267–269
- ⁹E. Fleury, S.M. Lee, W.T. Kim, D.H. Kim, *J. Non-Cryst. Solids* **278** (2000) 194–204
- ¹⁰S. Bonasso, P. Pigeat, D. Rouxel, B. Weber, *Thin Solid Films* **409** (2002) 165–171
- ¹¹A. Haugeneder, T. Eisenhammer, A. Mahr, J. Schneider, M. Wendel, *Thin Solid Films* **307** (1997) 120–125
- ¹²T. Grenet, F. Giroud, J.L. Joulaud, M. Capitan, *Phil. Mag. A* **82**(16) (2002) 2909–2922
- ¹³L. Zhang, R. Lück, *J. Alloys Compounds* **342** (2002) 53–56
- ¹⁴E. Fleury, Y.-C. Kim, J.-S. Kim, H.-S. Ahn, S.-M. Lee, W.-T. Kim, D.-H. Kim, *J. Mater. Res.* **17**(2) (2002) 492–501
- ¹⁵D.J. Sordelet, M.F. Besser, J.L. Logsdon, *Mater. Sci. Eng. A* **255** (1998) 54–65
- ¹⁶C.I. Lang, D.J. Sordelet, M.F. Besser, D. Shechtman, F.S. Biancanello, E.J. Gonzalez, *J. Mater. Res.* **15**(9) (2000) 1894–1904
- ¹⁷J. Kong, C. Zhou, S. Gong, H. Xi, *Surf. Coat. Technol.* **165** (2003) 281–285
- ¹⁸D.J. Sordelet, S.D. Widener, Y. Tang, M.F. Besser, *Mater. Sci. Eng. A* **294–296** (2000) 834–837

UPORABA VAKUUMA V MEDICINI

Jože Gasperič

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Pregledni članek obravnava uporabo vakuuma v medicini ter aparate in naprave za doseganje želenega vakuuma. Le-tega uporabljajo predvsem v kirurgiji, urgentni in transfuzijski medicini, porodništvu, stomatologiji, v splošnih in specialističnih ambulantah oz. zdravstvenih domovih ter na klinikah za sukcijo izločkov, krvi, humanega mleka, za bronhialno toaleta (inhalatorji), sterilizacijo medicinskih pripomočkov, liofilizacijo, filtracijo, destilacijo, odvzemanje vzorcev tkiv itd. V članku so bolj podrobno opisani tudi nekateri postopki, njihove značilnosti in prednosti.

Applications of vacuum technique in medicine

ABSTRACT

The review of applications of vacuum technique in medicine, apparatus and equipments for the production of desired vacuum are presented. Vacuum is applied especially at surgery operations in urgent and transfusion medicine, obstetrics, stomatology, in ambulances, hospitals, etc. for suction of secrets, blood, human milk, for bronchial toilet (inhalators), sterilization of medical tools and clothes, for freeze drying of blood plasma, filtration, distillation, taking out the samples of tissue, etc. In this review some processes, their characteristics and advantages are described in details.

1 UVOD

Vakuumska tehnika je že skoraj zapolnila vse pore našega življenja, zato jo najdemo tudi v medicini. Uporabljajo jo v kirurgiji, urgentni in transfuzijski medicini, porodništvu, stomatologiji, v splošnih in specialističnih ambulantah oz. zdravstvenih domovih ter na klinikah za sukcijo izločkov, krvi, humanega mleka, za bronhialno toaleta, sterilizacijo medicinskih pripomočkov, liofilizacijo (npr. krvne plazme), filtracijo, destilacijo, odvzemanje vzorcev tkiv itd.

Vsi vakuumski aparati in naprave pa morajo izpolnjevati poleg splošnih tudi posebne zahteve medicine, ki so naslednje: preprosto upravljanje, povečana zaščita pred nevarnostjo dotika električnih vodnikov, možnost sterilizacije priključkov (sond, cevi, posod...), bakterijska filtracija izpustov črpalk, minimalni hrup.

Področje vakuuma, ki se uporablja v medicini, je med 1000 mbar in 10 mbar, pri liofilizaciji (sušenju v zmrznjenem stanju; angl. freeze drying) krvne plazme od 1 mbar do 10^{-3} mbar, za taljenje in ulivanje kovin v dentalni protetiki pa okoli 10^{-4} mbar.

2 VAKUUMSKA SUKCIJA V KIRURGIJI

Kirurgije si ne moremo predstavljati brez vakuumskih sukcijjskih aparatov za aspiracijo telesnih tekočin (krvi) in izločkov. V večjih kirurških centrih po svetu

uporabljajo t. i. "centralni vakuum", ki pa ga sedaj opuščajo, ker ugotavljajo, da so se z leti uporabe v razvodnih ceveh, ki jih ni mogoče preprosto sterilizirati, naselile kolonije raznih patogenih bakterij. Ti mikroorganizmi pa potujejo tudi protitočno in tako pridejo končno v stik s pacientom, kar lahko povzroči dodatne postoperativne komplikacije. Zato uporabo "centralnega vakuuma" odsvetujemo ter priporočamo samostojne aspiratorje, kot sta npr. taka, ki sta prikazana na sliki 1.

Glavni deli vsakega vakuumskega aspiratorja so naslednji: vakuumska črpalka (rotacijska ali membranska), steklene posode ali plastenke za telesne tekočine, sesalni priključek s kanilo, ventil za zvezno nastavljanje (uravnavanje) primerne vakuuma od 1000 mbar (atmosferski tlak) do 150 mbar, merilni instrument (vakuummeter), nožno stikalo za električni vklop in izklop aparata. Vsi deli, ki pridejo v stik z aspirirano tekočino in pacientom, morajo biti sterilni. Navadno imajo aspiratorji vgrajen izpustni bakterijski filter in elektronsko varovalo nivoja tekočine v aspiracijski posodi.

Nastavitev vakuuma (sesalnega tlaka) je zelo pomembna, saj mora biti taka, da ne pride ob stiku s tkivom do zamašitve aspiracijske sonde in poškodbe tkiva. Aspiratorji za kirurške namene navadno delujejo tiho in mirno, primerno okolju (kirurški dvorani).

Za ambulantne, tj. manjše kirurške posege so priročnejši manjši prenosni aparati (slika 2), ki jih lahko uporabljamo tudi za občasne aspiracije dihalnih poti (bronhialna toaleta), čiščenje sluhovoda (zaradi cerumna) pa tudi v zdravstvenih laboratorijih za filtracije, destilacije in sušenje, za hermetično zapiranje raznih posod, odvzemanje vzorcev ipd. Vakuumska črpalka je navadno membranska, prav tako se da z ventilom nastaviti primeren vakuum in loviti tekočino v posodo. Tudi druga oprema je enaka ali podobna večjim izvedbam aspiratorjev.

Za reševalna vozila in aspiracije na terenu (prometne nesreče) se uporabljajo podobni mali aspiratorji na akumulatorski (12 V) pogon.

3 VAKUUMSKA SUKCIJA V PORODNIŠTVU

Poleg uporabe, ki je kirurškega značaja, pa se v porodništvu uporabljajo prirejani aspiratorji za odvzemanje humanega (materinega oz. ženskega) mleka (slika 3). Načeloma je aparat enak prej opisanemu malemu aspiratorju, s tem da je steklena posoda (zbiralnik mleka) oz. njena odprtina oblikovana tako,



Slika 1: Vakuumska aspiratorja za uporabo v kirurgiji in ginekologiji (izdelka Vacutech, d. o. o., Ljubljana)

da ustreza fiziološkim zahtevam in obliki dojke oz. areole. Vakuum je nastavljen z ventilom, nastavev jakosti črpanja je individualna. Ritem naravnega sesanja dojenčka pa lahko vsaka mati uravnava s tem, da s prstom odpira in zapira cevni nastavek na vrhu zbiralnika.

Odvzemanje materinega mleka je posebno pomembno pri prezgodaj rojenih otrocih (prematurosi) in pri tistih, ki so se sicer rodili v predvidenem času, vendar z zelo nizko porodno težo (pod 2000 g). Le-ti imajo omejene intestinalne in prebavne funkcije ter nezrel imunski sistem. Kompleksno delovanje ženskega mleka je imunoprotektivno, mleko ima idealno kalorično distribucijo in je dobro izkoristljivo. Kolostrum stimulira rast in dozorevanje črevesne sluznice. Ugotovljeno je bilo, da je mleko ženske, ki je rodila prematurusa v prvem mesecu, bogatejše z beljakovinami, natrijem in s klorom ter je torej prilagojeno za rast in razvoj nedonošenčka. Mleko teh mater vsebuje imunoglobulin A (IgA) kot mleko mater donošenih otrok in je pomembna zaščita pred nekrotizantnim enterokolitisom.

Znano je, da ni lahko obdržati laktacije (nastajanje in izločanje mleka iz mlečnih žlez) tedne dolgo pri materah, ki so prezgodaj rodile. Problemi zaradi prezgodnjega poroda, težave, ki jih ima otrok prve dni in tedne, so hud stres za mater. Poleg pomanjkanja ustreznih fizioloških dražljajev stres tudi negativno vpliva na laktacijo. Večina žensk želi čim prej zapustiti porodnišnico, preden je lahko odpuščen otrok. Tedaj je uporaba tega vakuumskega aparata

izjemno dragocena, saj lahko matere odvzamejo ("izbrizgajo") mleko doma in ga v sterilnih otroških stekleničkah prinašajo v porodnišnico svojemu nedonošenčku, ki je v inkubatorju in ga dobiva po gastrični sondi. S tem pa si tudi ohranijo laktacijo. Aparat pride tudi v poštev v primeru hospitalizacije dojenčka, saj ni potrebe, da bi v bolnici ostala tudi njegova, sicer zdrava mati, in tudi nasprotno.



Slika 2: Mali prenosni aspirator



Slika 3: Odvzemnik materinega mleka

Z uporabo vakuumskega odvzemnika je preprečena možnost okužbe in s tem vnetja dojke (mastitis), ki je sicer pogosto pri ročnem iztiskanju mleka.

Ker pa je uporaba vakuumskega aparata za odzemanje mleka časovno omejena, tj. za čas bivanja otroka v porodnišnici oz. bolnici, pa tudi kasneje doma, je smiselna izposojevalnica (ne individualni nakup) teh aparatov, kar poteka v Ljubljani že 20 let (od l. 1983 dalje). O tem, kako je pomembno dojenje oz. hranjenje z materinim mlekom za telesni razvoj novorojencev in kasneje vse življenje, pa je že splošno znano.

4 LIOFILIZACIJA ALI SUŠENJE V ZMRZNJENEM STANJU

Vakuumska liofilizacija v medicini se uporablja največ za sušenje krvne plazme. Naprave so instalirane v ustanovah, ki se ukvarjajo s transfuzijsko medicino. Liofilizirano plazmo se da hraniti v primernih prostorih nekaj let (do 5 let). Glavni deli teh naprav so vakuumске rotacijske črpalke, ki črpajo ohlajeno komoro (temperatura okoli $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), v kateri so posebni kozarci s predhodno globoko zmrznjeno krvno plazmo, ki se tako osuši do nekaj mg/kg tekoče faze. Drugi sestavni deli so razni merilniki temperature, tlaka ter pisalniki, ventili, vse kar je potrebno za delovanje naprave v območju tlakov od 1000 mbar do 10^{-2} mbar.

Manjše liofilizatorje uporabljajo razni medicinski inštituti za sušenje tkiv, kosti itd. ter za pripravo vzorcev za mikroskopiranje.



Slika 4: Inhalator

5 INHALATORJI

Inhalatorji ne bi spadali na področje uporabe vakuumске tehnike, če ne bi imeli vgrajene membranske vakuumске črpalke, ki jo lahko uporabljamo tudi kot kompresor za tlake okoli 4 bar. Kompresor potiska stisnjen zrak po plastični cevi skozi šobo razpršilnika, ki ima rezervoar s tekočim medikamentom in ga razpršuje v drobne kapljice (debelina nekaj mikrometrov). Le-te kot meglica izhajajo skozi odprtino maske, ki si jo pacient pritisne na obraz in inhalira (slika 4). Od velikosti kapljic je odvisno, kako daleč bodo prodrle v pacientova pljuča. Večje kapljice ovlažijo le nosno votlino, manjše pa sapnični (bronhialni) del. Da bi kapljice medikamenta prodrle globlje v pljuča, so potrebne druge vrste inhalatorjev (npr. piezoelektrični), ki ustvarjajo še manjše kapljice medikamenta.

6 PERISTALTIČNE ČRPALKE*

Tisti, ki se ukvarjamo z vakuumskimi črpalkami, bi jih le s težkim srcem uvrstili med vakuumске, pa čeprav morajo ustvarjati vakuum, da sploh lahko opravljajo svoje delo, tj. črpanje tekočin ali plinov.

Črpalka je sestavljena iz treh glavnih delov: ohišja, rotorja s tremi valji in prožne plastične cevi. Po "vakuumsko" bi lahko rekli, da ima en konec te cevi sesalno odprtino, drugi pa izpustno. Cev je tesno vstavljena (stisnjena) med rotor in ohišje črpalke. Trije valji na rotorju, ki ga poganja elektromotor, se "peljejo" po cevi, ki miruje, in jo stiskajo eden za drugim ter s tem potiskajo tekočino ali plin v izpustni

*Ime teh črpalok izhaja iz grške besede, ki pomeni stiskajoč od vseh strani. Peristaltika pa je bolj znana v medicini, kjer pomeni neodvisno ritmično gibanje mišičevja v črevesju, neke vrste "črvasto" gibanje.

smeri. Tisti del cevi se potem, ko je "preživel" stisk valja, povrne v prvotno obliko, pri tem pa ustvari v svoji notranjosti podtlak ali vakuum, ki potegne novo količino tekočine iz posode, ki jo praznimo, na drugi strani cevi pa se prej zajeta tekočina iztisne tja, kamor smo predvideli (npr. v žilo pacienta), povratni tok pa ni mogoč.

Končni vakuum, ki ga peristaltična črpalka lahko ustvari, je okoli 200 mbar. Te vrste črpalk lahko uporabljamo tudi kot kompresorje, saj so sposobne komprimirati tekočine do 2,7 bar (normalno 1,7 bar) oz. delovati pri takem tlaku tekočine (plina) v cevi. Pretoki so odvisni od velikosti pretočne cevi - od nekaj ml/min do 50 l/min in več, kar lahko natančno uravnavamo (preciznost $\approx 0,5\%$ ali še manj). Smer vrtenja rotorja lahko obračamo, s tem pa tudi smer pretoka tekočine. Velikost pretoka je odvisna tudi od hitrosti vrtenja rotorja, ki je navadno nastavljiva, od prereza (odprtine) cevi, viskoznosti tekočine in fleksibilnosti plastične cevi. Peristaltične črpalke so lahko enostopenjske (rotor stiska le eno cev) ali večstopenjske (rotor stiska več vzporedno postavljenih cevi, navadno največ štiri). Uporabnost teh črpalk je zelo velika; v medicini predvsem za infuzije, sukcije, doziranje medikamentov, jemanje vzorcev, poudarek pa je na sterilnosti postopkov.

7 VAKUUMSKA STERILIZACIJA

Vakuumska sterilizacija je eden izmed fizikalnih oz. "mehanskih" načinov uničevanja mikroorganizmov. Za take načine sterilizacije se je v medicini oz. mikrobiologiji udomačil izraz "suha sterilizacija".

Pri vakuumskem načinu gre za uničevanje tistih mikroorganizmov, ki v vakuumu ne morejo preživeti zaradi razredčene atmosfere oz. ne zdrže hitrega zmanjšanja tlaka ("šok-evakuacija") ter hitre dehidracije oz. osušitve.

Vakuumski način je v medicini uporaben predvsem za shranjevanje sterilnih predmetov in oblačil, da se ne bi inficirali, ter za sterilizacijo instrumentarija, terapevtskih pripomočkov ipd. To ni popolna sterilizacija, kajti znano je, da nekateri mikroorganizmi, predvsem sporogeni, prenesejo vakuumsko tretiranje. Če pa je vakuumski način kombiniran še s povišano temperaturo, je učinek uničevanja nekaterih mikroorganizmov boljši. Stranski učinek vakuumskega postopka je tudi dezodoracija (npr. razdišavljenje pri oblačilih).

Vakuumska sterilizacija ni uporabna samo v medicini, ampak tudi v prehranski in farmacevtski industriji (kombinirana s fumigacijo).

V zadnjih desetletjih se je zanimanje za vpliv vakuuma na preživetje mikroorganizmov povečal predvsem zaradi vesoljskih raziskav oz. zaradi vse pogostejših stikov vesoljskih plovil z drugimi planeti.

Raziskave pa potekajo v območju ultravisokega vakuuma, ki vlada v medplanetarnem prostoru, na najbolj odpornih mikroorganskih kulturah.

Načina boja proti mikroorganizmom, ki so patogeni in povzročajo razne infekcije pri ljudeh in živalih oz. razkrajajo organske snovi, sta v glavnem dva: kemijski, ki ga imenujemo dezinfekcija oz. antiseptika, in fizikalni. Ta razmejitev seveda popolnoma ne ustreza, ker je pogosto učinek uničevanja mikroorganizmov kombiniran, torej fizikalno-kemijski ali nasprotno.

Pri fizikalnem načinu vplivanja na mikrobo oz. njihovo uničevanje uporabljamo toploto (sušenje) in zmrzovanje, mletje oz. drobljenje, visoke tlake in vakuum, zvočna in nadzvočna valovanja, radioaktivno sevanje, površinsko napetost, UV-sevanje itd.

Smatra se, da so mikroorganizmi uničeni oz. mrtvi, kadar izgube svojo reprodukcijsko moč. Število preživelih navadno pada eksponentno v odvisnosti od časa sterilizacije. Pri vakuumskem načinu sterilizacije pride tudi do ohlajanja in zmrzovanja (zaradi hitrega izhlapevanja tekočega medija), pri katerem večina bakterijskih kultur preneha rasti že pri temperaturah od $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ nad zmrziščem. Ker ne rastejo več, počasi odmirajo, ne da bi zmrznile. Pri zmrzovanju oz. zledenitvi se v celicah bakterij ustavi metabolizem. Zmrznjenje vode v njih spremlja ekspanzija, nastajajo kristali in koloidne spremembe. Ekspanzija ledu sicer ne poškoduje elastičnih celic, pač pa lahko ostri robovi ledenih kristalov preluknjajo plazmatsko membrano. Vendar nekatere bakterije, kvasovke in plesni prežive mnogo let zmrznjene, zato npr. ni mogoče sterilizirati vode z zmrzovanjem. Nenavadno veliko odpornost imajo trosi. To so najbolj odporni organizmi, ker imajo elektrolitično vsebino. Kisik, katerega tlak lahko uravnavamo tudi z evakuiranjem okolice, ne vpliva na čas uničenja mikroorganizmov.

Vakuum nastopa pri različnih vrstah sterilizacije tudi kot ena izmed tehnoloških faz. Pri tem ne gre za neposreden vpliv oz. namen, da bi z vakuumom uničevali mikroorganizme, pač pa, da bi "očistili" oz. pripravili sterilizacijsko komoro za uvajanje plinov oz. pare. Najbolj pogoste vrste sterilizacije, pri katerih uporabljamo vakuum kot vmesno (pomožno) tehnološko fazo, so:

- gretje pri nizkem tlaku in z nizekotlačno paro
- plinska sterilizacija
- obsevanje.

Pri sterilizaciji z gretjem (do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 h) sicer ne uporabljamo vakuuma, pač pa mora biti sterilizacijska komora vakuumsko tesna, kar je treba predhodno ugotoviti. Če steriliziramo z vročo paro pri povišanem tlaku (avtoklavi z nizekotlačno paro), moramo pred uvajanjem pare izčrpati komoro vsaj na 100 mbar


(priporočljivo 1 mbar), kajti zrak ovira prodor pare v snov, ki jo želimo sterilizirati.

Drugi način je, da paro uvajamo z zmanjšanim tlakom. V tem primeru moramo komoro evakuirati, vpustiti paro pri temperaturi od 60 °C do 80 °C (eno do dve uri) z dodatkom baktericidne snovi (npr. 38 % formaldehida). Po končanem postopku celotni medij odstranimo z rotacijsko črpalko ali s črpalko z vodnim obročem.

Pri plinski sterilizaciji je treba evakuirati komoro najmanj do 1 mbar in šele nato vanjo spustiti baktericidni plin (npr. etilenoksid, propilenoksid, formal-

dehid, metilbromid, kloropiorin, epibromohidrin, epiklorohidrin, ozon itd.). S temi plini pa je treba ravnati zelo previdno, ker so močno strupeni, nekateri tudi vnetljivi oz. eksplozivni. Za črpanje je priporočljivo uporabljati t. i. "suhe" rotacijske črpalke, na njihovem izpustu pa je treba strupene pline uničiti (razstrupiti), da ne bi zastrupljali okoliškega zraka.

Uporaba raznih vakuumskih pripomočkov v medicini, kot so npr. vakuumske pincete, Hipokratove čepice v porodništvu itd. v tem sestavku ni obravnavana.



Vacutech

OVIRNO STIKALO MOČNO STIKALO VAKUUM

MEDICINSKA OPREMA

Smo relativno mlado podjetje, vendar imajo naši strokovnjaki dolgoletne izkušnje v razvoju in izdelavi vakuumskih sistemov in komponent za uporabo v medicini. Naše znanje nam omogoča stalno izboljševanje zasnove in tehnologije izdelave naših proizvodov. Vacutech, d.o.o. je član Tehnološkega parka Ljubljana, kar nam omogoča večjo prilagodljivost zahtevam tržišča in še povečuje razvojno-raziskovalne možnosti podjetja. Naš proizvodni program obsega izdelavo:

- vakuumskih aspiratorjev,
- inhalatorjev,
- odzemnikov materinega mleka.



Naše naprave so namenjene uporabi v bolnišnicah in zdravstvenih domovih, kot tudi pri domači negi. Njihova zasnova zagotavlja preprosto uporabo in upošteva mednarodne standarde ter zahteve medicinske in vakuumske tehnike.

VAKUUMSKA TEHNIKA

Vacutech je eno izmed redkih, če ne celo edino slovensko podjetje, ki se ukvarja z razvojem in serijsko proizvodnjo visokovakuumskih sistemov in komponent. Zaradi malega števila podjetij v Sloveniji, ki uporabljajo vakuumsko tehniko, je naša orientacija predvsem tuje tržišče. Ker smo relativno mlado podjetje, naš program trenutno obsega razvoj in proizvodnjo:

- oljnodifuzijskih črpalk,
- vakuumskih veznih elementov,
- vakuumskih komor,
- kotnih ventilov in stikal.



Pripravljamo pa že proizvodnjo vakuumskih ploščnih ventilov. Naši proizvodi so narejeni v skladu z ultra- in visokovakuumskimi zahtevami ter mednarodnimi vakuumskimi standardi in predpisi. Konstantno izboljševanje zasnove in tehnologije izdelave naše izdelke uvršča ob bok izdelkom ostalih svetovnih proizvajalcev vakuumskih komponent.


KJE SMO

Vacutech d.o.o.,
Teslova 30,
1000 Ljubljana

tel.: 01/477 66 55
fax: 01/477 66 70
url: www.vacutech.si
e-pošta: info@vacutech.si

SMO ČLANI

Vacutech je član Tehnološkega parka Ljubljana



PVD-PREVLEKE ZA ZAŠČITO ORODIJ ZA SUHO OBDELAVO

Peter Panjan

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Suha obdelava postaja danes vse bolj pomembna. Razlogi za to so predvsem ekološke in ekonomske narave. Če se odpovemo uporabi hladilno-mazalnih tekočin, potem se pri obdelavi pojavijo številni problemi zaradi povišanih temperatur, skrajšanja trajnosti orodja in težjega odvajanja odrezkov. Preiskusi so pokazali, da lahko trajnost orodja pri suhi obdelavi povečamo tako, da ga zaščitimo s kombinacijo trde prevleke in tanke plasti trdega maziva.

PVD coatings for protection of tools for dry machining

ABSTRACT

Today dry machining applications are more and more important. The motivation for this technology is both ecological and economical. However the elimination of metalworking fluids can cause a variety of machining problems related to heat, tool life and chip removal. In dry cutting operations, tests have shown that the lifetime of tools could be increased by using a tool that is coated by a combination of hard and lubricant layer.

1 UVOD

Obrabo orodij bistveno zmanjšamo z uporabo hladilno-mazalnih tekočin. Njihov pomen je naslednji: a) zmanjšajo trenje na stiku orodje-obdelovanec, b) odstranjujejo (odplakujejo) odrezke, c) hladijo orodje in d) orodje zaščitijo pred korozijo. Tako je npr. v primeru vrtnanja uporaba hladilno-mazalnih tekočin potrebna zato, ker odvaža ostružke, ki bi se sicer nalepili na steno luknje. To bi bistveno poslabšalo kvaliteto obdelave površine. Hladilno-mazalne tekočine zmanjšajo tudi navor na sveder. Prav tako so neizogibne pri obdelavi materialov, ki se težko obdelujejo in pri zahtevnih obdelovalnih operacijah. Hlajenje in mazanje se uporablja pri obdelavi aluminijevih zlitin in nerjavečega jekla, tj. pri materialih, ki se radi lepijo na orodje.

Danes je večina tehnologov še vedno prepričana, da so hladilno-mazalne tekočine pri rezalnih postopkih obdelave neizogibno potrebne. V praksi je v mnogih primerih to res, vendar poznamo vse več obdelovalnih operacij, kjer niso potrebne oz. so celo škodljive. Primer so rezalna orodja, narejena iz novejših orodnih materialov, in visokohitrostna obdelava. Orodja iz karbidne trdine, prekrita z ustrežno zaščitno prevleko, režejo pri velikih hitrostih celo veliko bolj učinkovito, če jih ne hladimo. Rezilni rob se namreč pri visokohitrostnem frezanju zelo trdega materiala lahko segreje na temperaturo več kot 1000 °C. Zaradi velike centrifugalne sile frezala prispe do kontaktne površine z obdelovancem le malo

hladilno-mazalne tekočine, pa še ta se zaradi visoke temperature rezilnega robu večji del upari, preden prispe do vroče cone orodja. Efekt hlajenja je zato precej zmanjšan. Ker se rezilni rob hladi samo v fazi, ko ne reže, so temperaturne fluktuacije rezilnega robu frezala v primeru hlajenja večje kot pri suhem frezanju. Posledica so termični šoki, ki povzročijo nastanek mikrorazpok na površini orodja.

Uporaba maziv in hladilnih tekočin pri odrezovanju in drugih postopkih obdelave materialov se zmanjšuje tudi zaradi ekonomskih, ekoloških in zdravstvenih razlogov. Ekonomski razlogi so povezani zlasti s stroški odstranitve porabljenih maziv in hladiv, ki naraščajo progresivno in postajajo vedno pomembnejši dejavnik. Reciklaža ene tone hladilne emulzije stane približno 800 €. V Nemčiji, kjer porabijo približno 650.000 ton mazalnih olj na leto, je ta strošek okrog 500 milijonov evrov na leto. Ocenjuje se, da je danes strošek hladilno-mazalne emulzije do 17 % cene izdelka, medtem ko je bil pred dvema desetletjema le 3 %. Ti stroški so torej nekajkrat večji od stroškov delovne sile ali od stroškov izdelave orodij.

Hladilno-mazalne tekočine so tudi eden od virov onesnaževanja okolja. Do njihove izgube pride v sami proizvodnji (še zlasti, če se uporablja emulzija v obliki megle), delno med čiščenjem končnih izdelkov. Tudi odlaganje hladilno-mazalnih tekočin ogroža tla, pitno vodo in zrak, zato je nadzor nad tovrstnim onesnaževanjem iz leta v leto strožji. Tako se je npr. v Nemčiji število zakonov, ki regulirajo odpadna olja z dveh v letu 1950 povečalo na današnjih več kot 30. Stroške odstranitve hladilno-mazalnih tekočin je treba plačati ob njihovem nakupu v obliki posebnega davka.

Znano je tudi, da reakcijski produkti v obliki aerosolov, ki nastanejo med procesom obdelave, povzročajo zdravstvene težave delavcem v proizvodnji (kožne alergije, poškodbe pljuč, rakasta obolenja). Delavci so zlasti ogroženi, kadar se za hlajenje uporablja emulzija, razpršena v meglo. Po nekaterih ocenah ima kar 53 % kovinostrugarjev kožne probleme, ki so posledica stika z omenjenimi sredstvi.

V nekaterih primerih obstajajo tudi tehnološki razlogi za suho obdelavo. Tak primer je frezanje s prekinitvami rezanja, kjer pride zaradi uporabe hladilne tekočine do učinka toplotnega udara in posledično do nastanka mikrorazpok. Pri suhi obdelavi tega problema ni. Drug primer je proizvodnja prehranskih in farmacevtskih izdelkov (npr. pri

ekstruziji tub za shranjevanje zdravil), kjer ni dovoljena kontaminacija izdelka s tekočinami za mazanje.

2 SUHA OBDELAVA

Vse to so razlogi, da v zadnjih letih postaja suha obdelava, tj. obdelava brez uporabe hladilno-mazalnih tekočin, vse bolj aktualna ⁽¹⁻⁷⁾. Uporaba suhe obdelave je možna samo pod pogojem, da zagotavlja enako obstojnost orodja, enako kvaliteto obdelovanca (hrapavost obdelane površine, dimenzijske tolerance) in enako produktivnost kot v primeru uporabe hladilno-mazalne tekočine.

Suha obdelava prinaša vrsto tehničnih problemov. Pri takšni obdelavi imamo opraviti z izjemno velikimi termičnimi in mehanskimi obremenitvami. To pa seveda vodi do povečane obrabe in skrajšanja trajnosti orodja. Obdelava brez hladilno-mazalne tekočine povzroči probleme z dimenzijsko stabilnostjo, površina obdelovanca je bolj hrapava, pojavijo se različne termične poškodbe in deformacije. Zaradi deformacije materiala obdelovanca in trenja se med postopkom rezanja na rezalnem robu več kot 90 % mehanske energije pretvori v toploto. Pri suhi obdelavi se poveča trenje in adhezija med orodjem in obdelovancem, ker se med obdelovanjem oba segrejeta na višjo temperaturo. Zaradi visoke temperature se pri suhem struženju trdih materialov površinska plast razkali, podobno kot pri elektroerozijski obdelavi ali grobem brušenju.

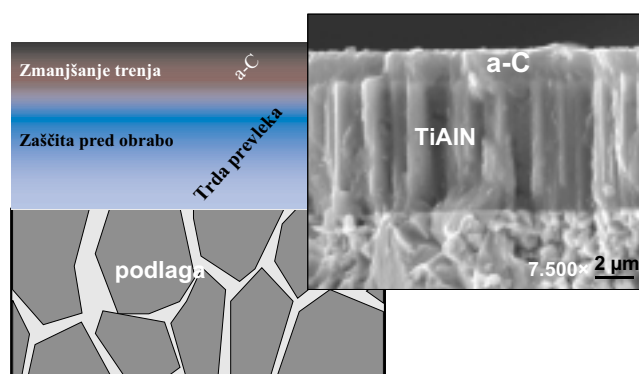
Suha obdelava zahteva spremenjeno geometrijo orodja. Tako je npr. pri suhem vrtanju problem odvajanje odrezkov iz luknje in deformacija luknje zaradi ekspanzije svedra pri visoki temperaturi. Prvi problem rešujejo s spremembo geometrije svedrov tako, da imajo odrezki več prostora za izhod. Drugi problem pa je možno rešiti tako, da ima telo svedra koničasto obliko (telo se zoži v smeri vpetja svedra). Orodje za suho obdelavo mora biti izdelano iz refraktornih materialov, da prenese visoke temperature. Hkrati mora biti čim trši in čim bolj žilav, da prenese velike mehanske obremenitve. Površina orodja pa mora biti praviloma zaščitena s prevleko, ki zmanjša trenje in adhezijo ter toplotne obremenitve orodja. Za hlajenje in odvajanje ostruškov je treba uporabiti curek stisnjene zraka.

Pri suhi obdelavi funkcijo hladilno-mazalne tekočine prevzamejo trde zaščitne prevleke ⁽¹⁻⁷⁾. Prevleka zmanjša trenje, poveča obrabno odpornost orodnega materiala in zmanjša ali prepreči nalepljanje materiala obdelovanca. Na površini prevleke niso zaželeni kemijske, mehanske ali tribološke interakcije z obdelovancem. Trde prevleke zmanjšajo temperaturne fluktuacije tako, da preprečujejo prenos toplote iz

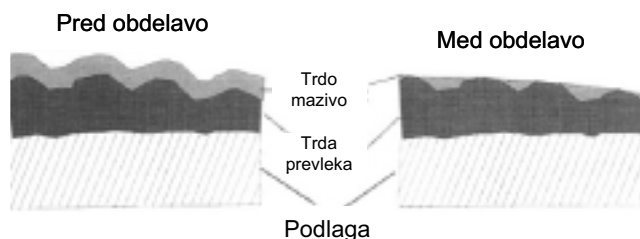
rezalne cone v orodje. Delujejo torej kot toplotna pregrada, ker imajo precej manjšo toplotno prevodnost kot material obdelovanca oz. orodja. Prekrita orodja zato absorbirajo manj toplote, zato prenesejo višje temperature. Da so termične napetosti v prevleki čim manjše, debelina le-teh ne sme biti prevelika. To je tudi razlog, da so npr. ploščice za freziranje praviloma prekrita s tanjšimi PVD-prevlekami, za katere so značilne tlačne napetosti, in ne s CVD-prevlekami, kjer so napetosti natezne, značilne debeline prevlek pa 5 μm do 10 μm . Tlačne napetosti v 2-3 μm debelih PVD-prevlekah, zagotavljajo zelo dobro trdnost rezalnega robu, boljšo lomno žilavost in večjo upogibno trdnost. Za zaščito ploščic za struženje pa so primernejše CVD-prevleke.

Zaradi visokih temperatur pri suhi obdelavi pridejo v poštev le termično stabilne trde prevleke, kakršna je npr. (Ti,Al)N keramična prevleka. V primerjavi z drugimi je oksidacijsko najobstojnejša, hkrati pa je slab toplotni prevodnik, zato se večina sproščene toplote odvede v odrezek. Te lastnosti so posledica oksidacije vrhnje plasti prevleke, pri čemer nastane tanka plast aluminijevega oksida, ki se med obratovanjem orodja nenehno obnavlja. Plast aluminijevega oksida se odlikuje z veliko mikrotrodoto, kar poveča obrabno obstojnost orodja, hkrati pa ima majhen koeficient trenja glede na jeklo, kar zmanjša rezalne sile in količino sproščene toplote.

Še bolj kot enojna plast (Ti,Al)N se za zaščito orodij za suho obdelavo obnese kombinacija trde prevleke (npr. (Ti,Al)N) in tanke plasti trdega maziva (npr. a-C, WC/C, MoS₂, DLC) (slika 1). Funkcija trde prevleke je zaščita pred abrazijsko in oksidacijsko obrabo, medtem ko tanka plast trdega maziva bistveno zmanjša trenje, prepreči lepljenje in zmanjša termično obremenitev orodja. Čeprav se vrhnja plast kaj kmalu izrabi, ostane mazivo v vseh mikrokraterjih in porah, ki jih je zlasti zelo veliko v prevlekah, ki so bile pripravljene s postopkom nanašanja s katodnim lokom



Slika 1: Kombinacija trde prevleke (TiAlN) in tanke plasti trdega maziva (a-C). Takšno prevleko, ki je primerna za zaščito orodij za suho obdelavo, lahko pripravimo v novi napravi CC800 v Centru za trde prevleke na Institutu "Jožef Stefan".



Slika 2: Shematski prikaz mehanizma mazanja površine orodja med procesom obdelovanja

(slika 2). V teh porah je mazivo vse do izrabe trde prevleke.

Možna področja uporabe kombiniranih prevlek te vrste so obdelava legiranih jekel, aluminijevih zlitin in litega železa. Specifični primeri uporabe so še vrtanje, vrezovanje navojev in frezanje aluminijevih zlitin. Uporabimo jih lahko tudi pri suhem preoblikovanju materialov, ki jih je težko obdelovati, kot so npr. magnezijeve zlitine, titanove zlitine in nerjaveče jeklo.

Za zaščito orodij za suho obdelavo je zelo primerna tudi prevleka na osnovi aluminijevega oksida. Takšna prevleka je izjemno trda, oksidacijsko in termično obstojna ter slab prevodnik toplote. To pa so ključne lastnosti, ki jih potrebujemo za zaščito orodij za suho obdelavo. CVD-postopek je bil dolgo časa edini primeren za nanos takšnih prevlek, danes pa jih je možno pripraviti tudi s PVD-postopki (naprševanjem).

Za suho obdelavo je posebej pomembna visoka trdota orodnega materiala v vročem stanju. Tako se npr. pri suhem frezanju litega železa pri 14.000 obratih/min in pomiku 39 m/min, rezilni rob se segreje na temperaturo med 600 °C in 700 °C. To pa je previsoka temperatura za uporabo frezal iz konvencionalnih orodnih materialov. Vedeti moramo, da se trdota vseh orodnih materialov z naraščajočo temperaturo zmanjšuje, najbolj pri ogljikovih jeklih in hitroreznem jeklu. Hitrorezna jekla zaradi popuščanja pri temperaturi nad 500 °C za suho obdelavo niso primerna. Karbidne trdine so uporabne, vendar pod pogojem, da je orodje prekrito z ustrežno zaščitno prevleko.

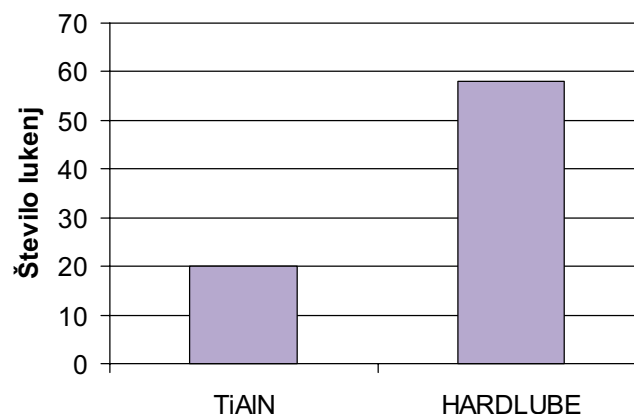
Visokohitrostna suha obdelava zahteva najsodobnejše orodne materiale, kot so kermeti, kubični borov nitrid in keramike (na osnovi silicijevega nitrida ali aluminijevega oksida). Tudi polikristalinični diamant je primeren za suho obdelavo, vendar le neferitnih materialov. Orodja iz teh materialov lahko uporabimo za suho obdelavo brez dodatne zaščitne prevleke. Za vse te našteje materiale je značilna visoka trdota v vročem stanju in velika odpornost proti abraziji, vendar pa so zelo krhki.

Kermeti npr. prenesejo veliko večje temperature kot karbidna trdina, vendar so v primerjavi z njo bistveno manj žilavi in odporni proti mehanskim

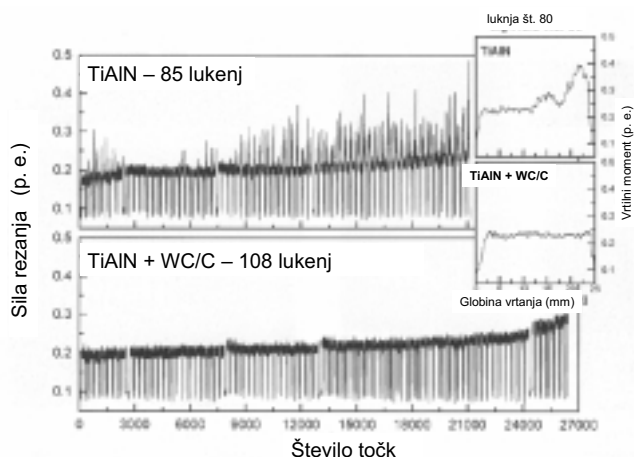
šokom. Kovinsko vezivo omejuje trdoto v vročem stanju, zato lahko s kermetnimi orodji obdelujemo materiale do trdote približno 40 HRC. Kermetne rezalne ploščice so idealne za fino suho obdelavo pri velikih hitrostih obdelave, pri majhnih pomikih in rezanju brez prekinitev. Pri tem ni nevarnosti nalepljanja materiala obdelovanca na rezilni rob. Niso pa primerne za obdelavo zelo trdih materialov in za grobo in srednje grobo obdelavo.

Tudi keramična orodja, ki so kemijsko zelo stabilna glede na material obdelovanca, lahko uporabimo za visokohitrostno obdelavo, končno obdelavo feritnih materialov in sive litine. Ne obnesejo pa se dobro pri obdelavi aluminijevih zlitin. Čisti aluminijev oksid ima izjemno veliko termično obstojnost in trdoto v vročem stanju, njegova slaba stran pa je majhna trdnost in žilavost. Z dodatkom viskerjev silicijevega karbida se omenjene slabosti precej odpravi. Podobno kot aluminijev oksid ima tudi silicijev nitrid visoko trdoto v vročem stanju, precej bolje pa prenaša termične in mehanske šoke. Vendar pa njegova kemijska stabilnost pri obdelavi jekla v primerjavi z aluminijevim oksidom ni tako dobra.

Kubični borov nitrid (c-BN), ki je ekstremno trd orodni material, se uporablja za obdelavo materialov, katerih trdota je večja od 48 HRC (c-BN se obrablja hitreje pri obdelavi mehkejših materialov). Ima visoko trdoto v vročem stanju vse do 2000 °C. Čeprav je bolj krhek kot karbidna trdina in manj termično in kemijsko stabilen kot keramika, ima v primerjavi z njo večjo udarno trdnost in lomno žilavost. c-BN je odličen toplotni prevodnik in relativno žilav material, zato je primeren za obdelavo pri velikih hitrostih rezanja, obdelavo s prekinitvami in pri relativno velikih obremenitvah rezalnega robu. Končna fina



Slika 3: Testni rezultat za primer suhega vrtanja s svedrom (premer 7,8 mm) iz karbidne trdine, ki je bil zaščiten z Balzersovima prevlekama TiAlN in Hardlube (TiAlN-WC/C). Obdelovanec je bil UTOP Mo1 (H11, DIN-1.2343) toplotno obdelan na 50 HRC. Parametri vrtanja: rezalna hitrost 80 m/min, pomik 0,12 mm/obrat, vrtali so slepe luknje, hlajenje s curkom stisnjenega zraka.



Slika 4: Sila rezanja na svedra HSS (premer 6 mm), prekrita s prevleko TiAlN in TiAlN+WC/C (Hardlube, Balzers), med vrtanjem ogljikovega orodnega jekla OCR 12 (DIN 1.2080, AISI D3). Parametri vrtanja so bili naslednji: hitrost rezanja: 20 m/min, pomik: 0,12 mm/obrat, globina vrtanja: 25 mm, hlajenje s curkom stisnjene zraka.

obdelava trdih materialov s ploščicami c-BN izpodriva drago in zahtevno obdelavo z brušenjem.

Najtrši in abrazijsko najodpornejši orodni material, polikristalinični diamant, je primeren samo za obdelavo neferitnih materialov. Če konico iz polikristaliničnega diamanta pritrdimo na ploščico iz karbidne trdine, se trajnost takšnega orodja poveča do 100-krat. Najpogostejši primer uporabe takšnih orodij je obdelava zelo abrazivnega aluminija, ki ima veliko vsebnost silicija.

3 PRIMERI UPORABE SUHE OBDELAVE

Na koncu omenimo še nekaj konkretnih primerov uporabe suhe obdelave. Za struženje in frezanje sive litine brez uporabe hladilno-mazalnih tekočin pridejo v poštev orodja iz keramičnih materialov in kubični borov nitrid. Ker ima c-BN večjo toplotno prevodnost kot keramični materiali, odvaja takšno orodje toploto veliko bolj učinkovito, zato je zelo primerno za visokohitrostno obdelavo. Lito železo lahko suho frezamo tudi s kermetnimi ploščicami pri velikih hitrostih obdelave. Obdelava pri velikih hitrostih je v tem primeru potrebna ne le za skrajšanje časa obdelave, temveč za skrajšanje kontaktnega časa med orodjem in obdelovancem in s tem prehod toplote z odrezka na orodje.

Pri frezanju superzlitin in titana s prekinitvami hlajenje povzroči termične šoke v vseh orodnih

materialih, zato se v takem primeru priporoča suha obdelava. Pri kontinuirni visokohitrostni obdelavi teh materialov pa je hlajenje potrebno.

Z vidika suhe obdelave je aluminij in njegove zlitine najbolj problematičen material. Zaradi njegove velike toplotne prevodnosti se v obdelovancu absorbira veliko toplote, kar povzroči deformacije zaradi njegove velike termične razteznosti. Problemi se pojavijo tudi pri sami tvorbi odrezkov. Zato je v primeru obdelave aluminija orodje treba zaščititi z ustrežno prevleko.

Pri suhi obdelavi neferitnih materialov se najbolje obnesejo orodja iz polikristaliničnega diamanta, ki se odlikuje z veliko toplotno prevodnostjo in kemijsko inertnostjo do aluminija.

Sliki 3 in 4 prikazujeta konkretne rezultate testov svedrov, ki so bili prekriti s kombinacijo trde prevleke in tanke plasti trdega maziva. Vidimo, da tanka plast trdega maziva WC/C bistveno podaljša trajnost svedra in zmanjša sila rezanja.

4 SKLEP

Suha obdelava različnih materialov obdelovancev postaja v zadnjih letih, zaradi vse večjih stroškov hladilno-mazalnih tekočin in zaradi njihove nevarnosti za okolje in zdravje ljudi, vse bolj aktualna. Za postopke suhe obdelave je ključnega pomena, da orodje ustrežno zaščitimo. Zaenkrat se je v ta namen najbolje obnesla kombinacija trde prevleke in tanke plasti trdega maziva. Takšno kombinacijo prevlek lahko pripravimo tudi v naši novi napravi. Najprej na podlago nanesimo približno 3 μm debelo plast TiAlN, nato pa še tanko plast (približno 1 μm) amorfnega ogljika.

5 LITERATURA

- ¹V. Deflinger, H. Brandle, H. Zimmermann, Surf. Coat. Technol. 113 (1999) 286–292
- ²T. Cselle, A. Barimani, Surf. Coat. Technol. 76–77 (1995) 712–718
- ³P. S. Sreejith, B. K. A. Ngoi, J. Mat. Proc. Technol., 101 (2000) 287–291
- ⁴N. M. Renevier, J. Hampshire, V. C. Fox, J. Witts, T. Allen, D. G. Teer, Surf. Coat. Technol. 142–144 (2001) 67–77
- ⁵H. K. Tonshoff, A. Mohlfeld, Surf. Coat. Technol. 93 (1997) 88–92
- ⁶M. Lahres, O. Doerfel, R. Neumuller, Surf. Coat. Technol. 120–121 (1999) 687–691
- ⁷I. J. Smith, W. D. Munz, L. A. Donohue, I. Petrov, J. E. Greene, Surf. Eng., vol. 14, 1 (1998) 37–39

MAGNETRONSKO NANAŠANJE VOLFRAMSKIH TANKIH PLASTI

Andrej Furlan, Nikola Radić

Institut »Ruđer Bošković«, Laboratorij za tanke filmove, Bijenička 54, 10000 Zagreb

POVZETEK

Volframske tanke plasti imajo zaradi svojih odličnih mehanskih in kemičnih lastnosti široko uporabo v industriji. Eden od načinov priprave volframskih tankih plasti je magnetronsko nanašanje. Ta postopek je sicer praktičen za industrijsko uporabo, vendar moramo upoštevati tudi njegove pomanjkljivosti, sicer je kakovost nanese volframske tanke plasti slaba. V tem delu obravnavamo probleme magnetronskega nanašanja volframskih tankih plasti. Opisujemo mehanizem nanašanja in pojav notranjih napetosti ter metastabilne β -faze volframa v odvisnosti od parametrov nanašanja.

Deposition of tungsten thin films by magnetron sputtering

ABSTRACT

Due to their excellent mechanical and chemical properties the tungsten thin films used very often in industry. One of the possible ways of their preparation is magnetron sputtering. This procedure can be easily used in the industrial practice. In order to obtain high quality films we have to consider also its drawbacks. In this paper the problems of magnetron sputtering of tungsten thin films are described. The mechanisms of growth, the intrinsic stress phenomena and the occurrence of metastable β -phase as a function of deposition parameters are explained.

1 UVOD

Zaradi svojih odličnih mehanskih lastnosti, visokotemperaturne stabilnosti in korozijske obstojnosti se volfram uporablja v industriji v različne namene. Prav zaradi teh izjemnih lastnosti je obdelava volframa zelo zahtevna. Zaradi tega je njegova uporaba pri izdelavi masivnih komponent še vedno zelo omejena. Namesto da bi celotne komponente izdelali iz volframa, raje uporabljamo postopek nanašanja tanke plasti volframa na komponente, ki so narejene iz materialov, ki jih je lažje obdelovati. Tako tanka plast volframa ščiti osnovni material pred zunanjimi vplivi. Eden od najpogostejših načinov nanašanja volframskih tankih plasti v industriji je magnetronski. Da bi pripravili tanko plast z želenimi lastnosti, je treba poznati značilnosti postopka tega nanašanja. Glavna značilnost pri tem je pojav notranjih napetosti v plasti. Te se pri magnetronskem nanašanju vedno pojavljajo in vplivajo na oprijemljivost plasti na podlago, kar zahteva uporabo plasti za določen namen. Razen tega se poleg stabilne α -faze volframa pod določenimi pogoji pojavlja tudi metastabilna β -faza, ki ni vedno zaželena.

2 INDUSTRIJSKA UPORABA MAGNETRONSKEGA NANAŠANJA VOLFRAMSKIH TANKIH PLASTI

Volfram se pogosto uporablja v mikroelektronskih vezjih z zelo visoko (VLSI) in ultravisoko stopnjo

integracije (ULSI) za metalizacijo in izdelavo povezav. Za ta namen se volfram najpogosteje nanaša na podlago z magnetronskim nanašanjem, čeprav se pri takšnem nanašanju pojavljajo nekatere težave. Prva je pojav mehanskih napetosti, ki je sestavljena iz dveh delov: napetost, ki se redno pojavlja kot posledica samega mehanizma nanašanja, in napetost zaradi nastanka že omenjene metastabilne β -faze volframa. Le-ta nastane, ker je magnetronsko nanašanje termično neravnotežen proces. Če so napetosti dovolj velike, lahko povzročijo luščenje plasti s podlage. Druga težava je visoka električna upornost β -faze volframa, zaradi česar so plasti z večjim deležem te faze neuporabne v mikroelektroniki.

V začetku osemdesetih let se je začela uporaba volframskih tankih plasti pri izdelavi mask za rentgensko svetlobo v rentgenski litografiji (XRL)⁽¹⁾. Za te namene se je prej uporabljalo zlato. Zaradi podobnega koeficienta absorpcije rentgenskih žarkov v območju valovnih dolžin 0,7-1,2 nm, ki so zanimive za XRL, volfram v zadnjem času vse bolj zamenjuje zlato. Med litografskimi procesi za submikrometerske tehnologije ima XRL zaradi svoje visoke ločljivosti veliko prednost. Maska za rentgenske žarke je sestavljena iz šablone, ki je določena s tanko plastjo težke kovine (ki dobro absorbira rentgensko svetlobo) debeline 100-600 nm, nanese na membrano, ki je prepustna za te žarke. Absorpcijska plast mora imeti veliko gostoto zaradi velike energije ustavljanja. Da bi se izognili popačenosti maske zaradi napetosti v nanese plasti, morajo biti le-te čim manjše in enakomerno razporejene v plasti.

Drugi primer uporabe volframskih tankih plasti je zaščita različnih komponent pred nezaželenimi vplivi, ki so jim izpostavljene med uporabo. Nezaželeni vplivi so lahko mehanske, toplotne ali kemične narave. Uporaba volframskih tankih plasti je zaradi izvrstnih lastnosti volframa velikega pomena.

Dober primer takšne uporabe je zaščita turbinskih lopatic pri reakcijskih motorjih (plinske turbine). Lopatice turbine so izpostavljene plinom iz komore za sežiganje, ki so segreti na temperaturo, višjo od tališča kovine, iz katere so narejene (lopatice se hladijo z zunanje strani skozi vmesne kanale s pretokom mrzlega zraka). Poleg tega so lopatice izpostavljene še korozijskim produktom, ki nastanejo med gorenjem, in močnim centrifugalnim silam, ki nastajajo zaradi hitrega vrtenja turbine. Jasno je, da v takšnih razmerah uporaba igra pomembno vlogo oprijemljivost plasti na podlago.

Do sedaj so v te namene uporabljali skoraj izključno plasti volframovega karbida (WC). V zadnjem času so se v nekaterih britanskih revijah za letalstvo pojavila poročila, da so se pri najnovejši generaciji motorjev začele uporabljati plasti čistega volframa. Pred tem je bilo očitno potrebno rešiti problem oprijemljivosti čistih volframskih plasti na podlago. Zaradi industrijske in vojaške uporabe teh tehnologij literaturni podatki niso dosegljivi.

Novejša uporaba volframskih tankih plasti, ki jo velja omeniti, so poskusi uporabe volframa pri izdelavi pihalnih glasbil. Prvi takšni poskusi so bili narejeni pred tremi ali štirimi leti pri izdelavi ustnikov za flavte. Ti deli so posebno občutljivi, ker so pri uporabi nenehno izpostavljeni vlagi (iz ust). Pomembno je preprečiti tudi nastanek kakršnekoli oksidacijske plasti. Za te namene se navadno uporablja srebro, platina ali zlato z večjim deležem bakra. Te kovine imajo visoko ceno, pa tudi nagnjenost k poškodbam je velika. Torej bi volfram pomenil idealno zamenjavo. Po prvih poskusih z volframom so delo prekinili zaradi izredno težke obdelave volframa. Tukaj se odpirajo možnosti za uporabo volframovih tankih plasti. Ustnik, ki bi bil narejen iz materiala, ki ga je lažje obdelovati, bi lahko zaščitili s tanko plastjo volframa.

3 MEHANIZEM NANAŠANJA TANKIH PLASTI

Pri postopku nanašanja tankih plasti z magnetronom je zgradba plasti odvisna od energije delcev, ki se kondenzirajo v tanki plasti. Delci, ki so razpršeni iz katode, imajo določeno energijsko porazdelitev. Na poti od katode do podlage izgubljajo energijo pri trkih z atomi delovnega plina v magnetronu. Energija in vpadni kot razpršenih delcev glede na podlago v največji meri določata ali ima plast amorfno ali kristalinično zgradbo. Poleg tega vplivata na velikost, mikrostrukturo in usmerjenost kristalnih zrn ter delež praznin. Za računanje energijske porazdelitve, ki jih imajo delci pri trku s podlago, je bilo treba razviti modele, ki opisujejo gibanje delcev od katode do podlage. To gibanje je v magnetronu zelo zapleteno. Zato je treba pri oblikovanju modela nujno uvesti veliko aproksimacij in povprečij.

Za gibanje razpršenih delcev v magnetronu so najpomembnejši: a) trki med razpršenimi delci in delci delovnega plina, ki so podobni trkom med trdimi krogli, z Lenard-Jonesovim potencialom ali z nekim drugim potencialom medsebojnega delovanja, ki je odvisen od energije delcev, b) problem kotne porazdelitve razpršenih delcev po trkih, c) problem začetne energijske porazdelitve razpršenih delcev in č) dogajanje z delci, ki so se odbili nazaj. V nekaterih

primerih je za kote razpršitve in za začetne energije možno vzeti povprečne vrednosti, toda za natančnejše modele se problem močno zaplete.

Energijsko porazdelitev razpršenih atomov lahko približno opišemo z izrazom ⁽²⁾:

$$n(E) = BE^{1/2} \cdot \exp(-E/E_0)$$

kjer je B konstanta, sorazmerna razpršitvenemu koeficientu (*sputtering yield*) in verjetnosti ionizacije delcev z elektroni iz plazme, E_0 pa je značilna vrednost energijske razdelitve. Z naraščanjem energije ionov, ki razpršujejo katodo, vrednost E_0 raste, kar pomeni, da povprečna energija razpršenih delcev raste.

Modeli prenosa delcev v magnetronu se delijo na numerična – Monte Carlo simulacije – in analitična računanja. Mehanizem prenosa delcev snovi, ki se vgrajujejo v tanko plast, od katode do podlage skozi delovni plin v cilindričnem magnetronu lahko opišemo s tremi modeli ⁽³⁾. Tlaki delovnega plina, ki veljajo za posamezni model, so bili izračunani za oddaljenost podlage od katode 50 mm in za napetost na magnetronu 380 V;

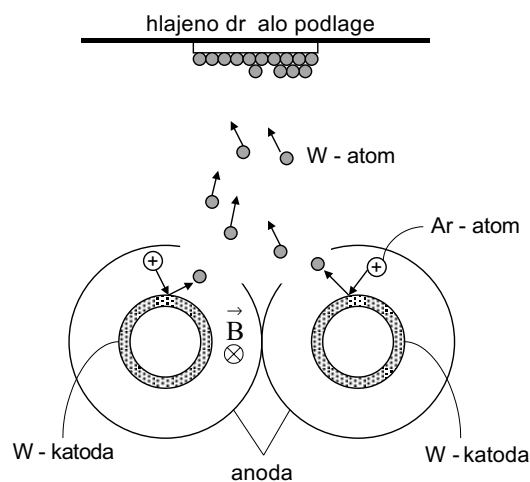
- 1) Po modelu, kjer privzamemo, da je prelet razpršenih delcev prost, se aproksimira situacijo, ko je število trkov na dolžini poti razpršenih atomov zanemarljivo. Da bi ta aproksimacija veljala, mora biti razmerje povprečne proste poti λ in dolžine narejene poti r večje od 1: $\lambda/r > 1$. Primerjava modeliranih in eksperimentalnih rezultatov pokaže, da v primeru volframa in za oddaljenost med katodo in podlago 50 mm takšen model velja do tlaka delovnega plina argona okoli 0,7 Pa.
- 2) Z naraščanjem tlaka delovnega plina v magnetronu se število trkov povečuje, tako da pri določenemu tlaku število trkov ni več zanemarljivo. Tu je treba upoštevati elastične trke med razpršenimi delci in atomi delovnega plina, zaradi česar se del delcev razpršuje nazaj in nikoli ne pride do podlage. Posledica je dejansko zmanjšanje gostote toka vstopajočega curka. Takšen model velja pri volframu za tlake delovnega plina do okoli 2 Pa.
- 3) Za večje tlake delovnega plina se število trkov toliko poveča, da niso več dvomljivi posamezni trki, pač pa se tok razpršenih delcev modelira z difuzijsko kontroliranim transportom.

4 METODE MAGNETRONSKEGA NANAŠANJA VOLFRAMSKIH TAKIH PLASTI

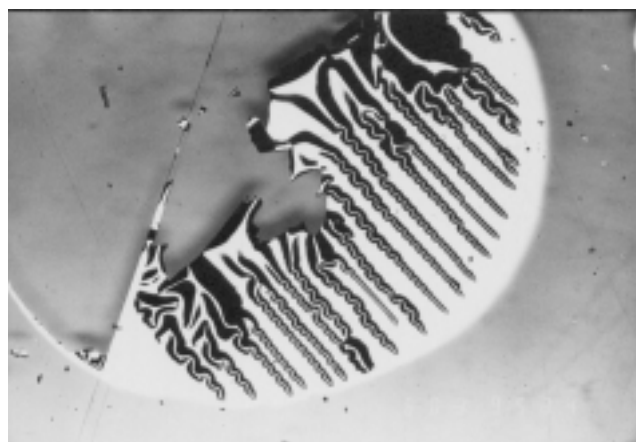
V naših raziskavah so bile volframske tanke plasti pripravljene s sočasnim nanašanjem čistega volframa iz dveh cilindričnih magnetronov lastne izdelave v enosmernem režimu dela (slika 1) na podlage iz

borosilikatnega stekla ali monokristalnega silicija okrogle oblike⁽⁴⁾.

Prva in najpomembnejša težava, na katero naletijo pri vseh tankih plasteh, torej tudi pri volframskih, je problem oprijemljivosti. Treba je doseči, da se plast po celi površini dotika podlage. Razlogi za nezadostno oprijemljivost so predvsem notranje napetosti v sami plasti in tudi zunanje, ki se pojavljajo zaradi različnih koeficientov termičnega raztezka volframa in podlage. Te napetosti se vedno pojavljajo in se jim ni mogoče izogniti. Zato se mora nanašanje izvajati na tak način, da se napetosti zmanjšajo na najmanjšo možno mero. Eden od načinov nadzora napetosti je, da se plast nanaša na rotirajočo se podlago. Tako se naj bi napetosti v plasti enakomerno razporedile v vseh smereh. Nasprotno pa je, če je podlaga vedno na istem mestu glede na magnetron, curek razpršenih delcev prihaja na podlago pod nekim stalnim kotom in povzroča napetosti vzdolž prednostne osi in pravokotno nanjo. Napetosti vzdolž prednostne osi povzročajo periodično kopičenje, pravokotno na to os. Posledica napetosti, pravokotno na prednostno os, so periodične neravnine, pravokotne na smer kopičenja (slika 2).

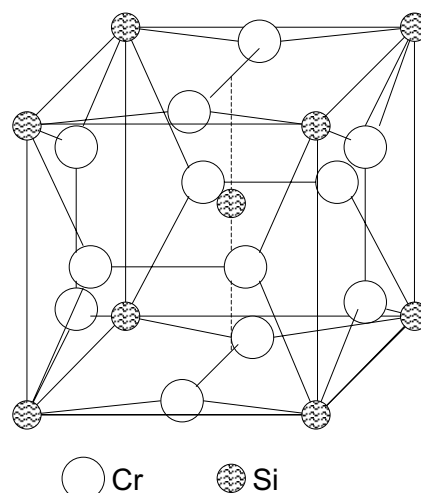


Slika 1: Shema in fotografija magnetrona, s katerim so bile narejene tanke plasti volframa



Slika 2: Luščenje volframskih tankih plasti zaradi notranjih napetosti (avtor posnetkov dr. M. Stubičar)

Pojav napetosti v volframskih tankih plasteh je tesno povezan z metastabilno β -fazo. Eksperimentalno je bilo ugotovljeno, da povečanje deleža β -faze vedno spremlja zmanjšanje tlačnih napetosti in povečanje nateznih. Nasprotno od stabilne α -faze, ki ima prostorsko centrirano kubično (bcc) zgradbo, ima β -faza t. i. A15-zgradbo Cr_3Si -razreda (slika 3). Mrežni parameter celice β -W je 0,5036 nm, celice α -W pa 0,3165



Slika 3: Zgradba osnovne celice A15 – strukture tipa Cr_3Si

nm. Razen tega ima A15-struktura 8 atomov na celico, medtem ko ima bcc-struktura samo 2 atoma na celico. Zaradi tega ima α -W, ki nastaja z razpadom metastabilnega β -W, mrežni parameter različen od mrežnega parametra α -faze. Ugotovljeno je bilo, da so v celici α -W vedno natezne napetosti. Te so značilne tudi za tanko plast takšnega materiala. Zaradi tega in zaradi prej omenjene zelo visoke električne upornosti β -W je ta volframova faza nezaželena v tanki plasti.

Obstaja več načinov, kako preprečiti nastanek β -W v volframskih tankih plasteh. Najenostavnejše so metode, s katerimi se povečuje termična energija atomov volframa, kar pospeši njihov prehod v stanje z nižjo energijo. V nadaljevanju bomo te metode natančneje opisali.

Ker je β -faza metastabilna, spontano prehaja v stabilno α -fazo tudi pri sobni temperaturi. Razpad β -faze volframa pri sobni temperaturi traja več mesecev ali celo let, gretje končnih sestavin na temperature, pri katerih prihaja do hitrega razpada ($> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$), pa je pogosto nepraktično, zlasti pri uporabi v mikroelektroniki. Objavljeno je bilo ⁽⁵⁾, da pri sobni temperaturi del β -faze prehaja v α -fazo že v 75 dneh. V naših raziskavah nismo opazili nikakršne vidne spremembe v deležu β -faze niti potem, ko so vzorci stali tri leta na sobni temperaturi. Bolj praktičen način zmanjšanja β -faze v tankih plasteh je pospeševanje njenega razpada z bombardiranjem tankih plasti z visokoenergijskim ionskim curkom, ki s trki prenaša kinetično energijo na atome volframa v plasti in jim tako omogoča, da lažje preidejo difuzijsko pregrado ⁽⁶⁾. Tako rešujejo le problem visoke električne upornosti volframskih tankih plasti z visokim deležem β -W, čeprav problem natezne napetosti, ki je posledica prehoda α -W v β -W, ostaja. Zaradi tega moramo tanko plast naprševati v takšnih razmerah, da se izognemo nastajanju β -faze. To bistveno zaplete stvari, ker poleg parametrov nanašanja, ki se lahko kontrolirajo (kot so temperatura podlage pri nanašanju in tlak delovnega plina v magnetronu), na nastajanje β -faze in pojav notranjih napetosti v veliki meri vplivajo tudi parametri, ki jih je zelo težko nadzorovati in katerih vpliv še ni popolnoma raziskan. To so v prvi vrsti nečistoče, ki se vgrajujejo v plast in vplivajo na stabilnost β -faze. Tu ima pomembno vlogo kisik.

5 RAST VOLFRAMSKIH TANKIH PLASTI IN NAPETOSTI V NJIH

Da bi se med naprševanjem volframskih tankih plasti ustvarilo čim manj β -faze, se mora plast nanašati v razmerah, ki omogočajo čim večjo gibljivost

napršenih atomov volframa na površini plasti. Velika energija jim omogoči prehod v stanja z nižjo energijo, ki ustrezajo nastajanju α -faze.

Za atom, ki se po površini plasti giblje naključno, je povprečna dolžina d , ki jo naredi v času t , podana z izrazom ⁽⁷⁾:

$$d = (Dt)^{1/2}$$

kjer je D difuzijski koeficient, opisan z enačbo:

$$D = D_0 e^{-E_D/RT}$$

E_D je aktivacijska energija difuzije, T je temperatura in R splošna plinska konstanta. Značilne vrednosti za atome volframa sta: E_D od 57 kJ mol^{-1} do 87 kJ mol^{-1} in $D_0 \approx 3,8 \cdot 10^{-11}\text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Iz tega je razvidno, da je difuzijsko gibanje atomov večje pri višji temperaturi. Torej bo nastajanje α -faze favorizirano pri čim višjih temperaturah podlage med nanašanjem.

Drugi parameter, ki vpliva na energijo razpršenih delcev, je tlak delovnega plina v magnetronu. Kot smo že omenili, se s povečanjem tlaka delovnega plina povečuje tudi število trkov razpršenih delcev z atomi delovnega plina. To povzroči premik maksimuma energijske porazdelitve razpršenih delcev proti nižjim energijam in povečanje vpadnega kota razpršenih delcev na podlago. Zaradi tega atomi volframa vse težje prehajajo difuzijsko pregrado na površini volframa in pogosto ostajajo v stanjih povišane energije. To je razlog za nastanek β -faze. Iz navedenega je jasno, da je prvo pravilo, ki ga je treba upoštevati, da bi se izognili nastajanju metastabilne β -faze pri nanašanju volframskih tankih plasti, da se plasti nanašajo pri čim nižjem tlaku delovnega plina in čim višji temperaturi podlage ⁽⁸⁾.

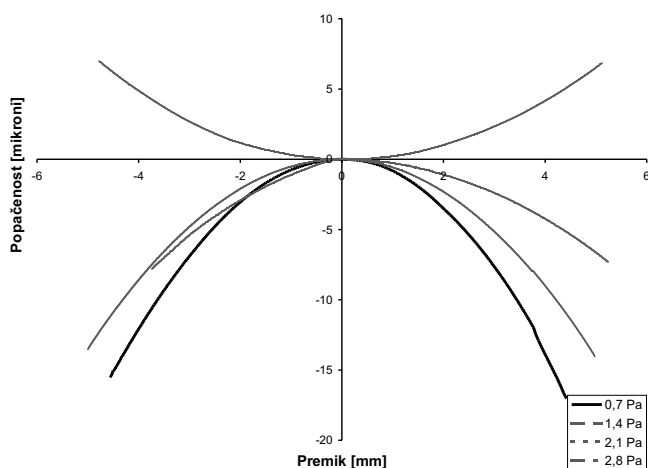
Temperatura podlage in tlak delovnega plina sta parametra nanašanja, ki ju je najlažje nadzorovati. Vendar obstajajo še drugi parametri, ki jih je zelo težko ali nemogoče nadzorovati. Znano je, da s povečanjem debeline plasti delež β -faze v plasti pade ^(5,8) in da je α -faza do debeline plasti okoli 50 nm natezno napeta. Ta natezno napeta α -faza nastane blizu meje s podlago s transformacijo β -faze, ki je nastala ob sami podlagi. Vzrok za pojav te β -faze je razlika v parametrih kristalne mreže ali amorfnosti zgradbe podlage in v parametrih kristalne mreže tanke plasti. Ta razlika v zgradbi povzroči, da naneseni atomi volframa ne zasedejo energijsko najbolj ugodnih stanj, zato nastane β -faza ⁽⁹⁾. Vidi se, da se tako nastala β -faza zaradi še neznanih razlogov hitro spremeni v stabilno α -fazo, in ker je ta α -faza natezno napeta, je jasno, da ne prispeva k dobri oprijemljivosti plasti na podlago.

Problem notranjih napetosti v plasti ne moremo reševati samo s prilagajanjem tlaka delovnega plina in

z uravnavanjem temperature podlage. Volframske tanke plasti, nanesene pri nizkih delovnih tlakih v magnetronu (do okoli 1,0 Pa), so sestavljene večinoma iz α -faze in imajo gosto stebričasto mikrostrukturo pod izrazitimi tlačilnimi napetostmi ⁽⁵⁾. Praznine med stebri in v njih so zelo redke ali jih sploh ni. Takšno zgradbo povzroča proces, ki se imenuje atomsko nabijanje (*atomic peening process*). Visoke povprečne energije razpršenih delcev volframa in njihova kotna razporeditev, ki ima maksimum pravokotno na podlago, favorizirajo večjo globino prodiranja prihajajočih delcev v plast, lokalno preurejanje in premike atomov. To pomeni, da imajo prihajajoči atomi in tisti atomi, ki so blizu mesta trka prihajajočega atoma, veliko gibljivost. Zaradi tega lahko prehajajo čez površinsko difuzijsko oviro in se lahko pomaknejo v položaje, ki omogočajo rast stabilne kristalne zgradbe.

S povečevanjem tlaka delovnega plina v magnetronu se povprečna energija prihajajočih delcev zaradi povečane razpršitve na atomih delovnega plina zmanjšuje, maksimum njihove kotne porazdelitve pa se vse bolj oddaljuje od smeri pravokotno na podlago nanašanja. Zaradi tega imajo atomi volframa na površju plasti vse manjšo gibljivost. Njihova energija ni dovolj velika, da bi atomi prišli v najbolj ugodna energijska stanja. To povzroči ustvarjanje praznin v plasti. Te se pojavljajo med stebri in v njih. Praznine povzročajo sprostitve tlačne napetosti, toda kohezijske sile med stenami praznin povzročajo pojav natezne napetosti. To povzroči, da imajo volframske tanke plasti, nanesene pri višjih tlakih delovnega plina v magnetronu, vse manj izraženo tlačno notranjo napetost, a vse bolj natezno.

Notranje mikronapetosti v tankih plasteh določimo iz polmera ukrivljenosti podlage, ki se upogne, če je dovolj tanka. Profili podlag se določajo s profilometrijo vzorcev (slika 4). V našem primeru so bile steklene podlage okrogle s premerom 10,8 mm in



Slika 4: Ukrivljenost steklenih podlag v odvisnosti od tlaka delovnega plina med naprševanjem

debelino 0,15 mm. Napetosti se izračunajo s Stoneyev enačbo, ki je v primeru, da je debelina podlage mnogo večja od debeline plasti (kar za volframske tanke plasti vedno velja), enaka:

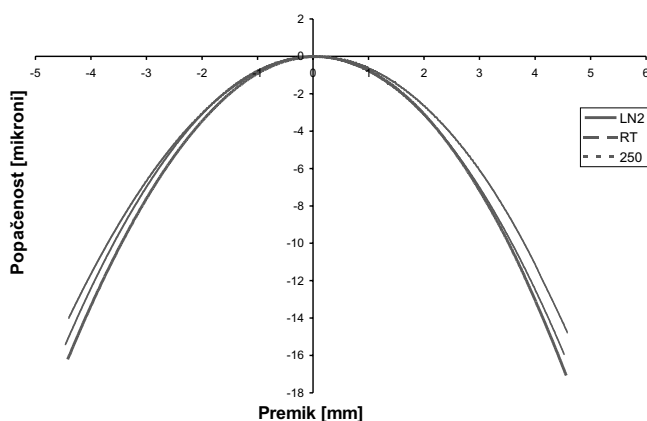
$$\sigma_f = \frac{1}{6R} \frac{E_s d_s^2}{(1 - \nu_s) d_f}$$

kjer so E_s , ν_s in d_s Youngov modul, Poissonovo razmerje in debelina podlage, d_f je debelina plasti in R polmer zakrivljenosti podlage. Če je plast nanesena pri temperaturi, različni od sobne, se zaradi različnih termičnih koeficientov raztezka podlage in plasti pojavijo termične (zunanje) napetosti. V tem primeru notranjo napetost plasti dobimo tako, da od skupne napetosti odštejemo termično (zunanjo) napetost. Za te primere velja prilagojena Stoneyeva enačba za termično napetost v plasti ⁽¹⁰⁾:

$$\sigma_{\text{ITER}} = \frac{(\alpha_s - \alpha_f) \Delta T E_f}{1 - \nu_f}$$

kje sta α_s in α_f koeficienta termičnega raztezka podlage in plasti, E_f in ν_f sta Youngov modul in Poissonovo razmerje plasti, ΔT je razlika med temperaturo nanašanja in sobno temperaturo. Tlačna napetost se v plasti zmanjša s povečanjem tlaka delovnega plina v magnetronu do popolne sprostitve, z nadaljnjim višanjem tlaka se napetost spremeni v natezno. Natezna napetost raste do neke določene vrednosti tlaka, pri katerem doseže maksimum. Te vrednosti so navadno nad 4 Pa in so odvisne od oddaljenosti podlage od katode. Po tej maksimalni vrednosti napetosti se z nadaljnjim naraščanjem tlaka napetost hitro zmanjša in asimptotično prihaja do popolne sprostitve vseh napetosti v plasti. Pojavlja se dendritska struktura z velikim deležem praznin.

Vzrok takšega vedenja napetosti v volframski tanki plasti je pojav prej omenjenih praznin v njej. Praznine med stebri in v njih imajo nasprotni učinek. Praznine v



Slika 5: Ukrivljenost steklenih podlag v odvisnosti od njihove temperature med naprševanjem plasti

stebrih povzročajo zaradi kohezivnih sil med stenami natezne napetosti v plasti. Praznine med stebri so večje, kohezivne sile med stenami pa ne prihajajo do izraza. Zaradi tega te praznine povzročajo le sprostitve tlačne napetosti. Zaradi teh dveh efektov se pojavlja prej omenjeni maksimum natezne napetosti. Dendritske zgradbe, ki nastajajo pri visokih tlakih nanašanja, se pojavijo takrat, ko praznine med stebri postanejo prevelike, da bi lahko prišle do izraza kohezivne sile med stenami. To povzroča hitro zmanjšanje natezne napetosti in amorfno rast plasti s popolnoma sproščeno zgradbo.

Z določitvijo deleža β -faze v volframski tanki plasti z rentgensko difrakcijo ali meritvami električnega upora plasti je bilo ugotovljeno, da ima ta delež svoj maksimum v bližini maksimuma natezne napetosti. To potrjuje tesno povezanost β -faze in natezne napetosti oziroma njun pojav kot rezultat kopičenja odlagajočih atomov volframa v višja energijska stanja.

Iz navedenega je razvidno, da notranjih napetosti in pojava β -faze zaradi njunega specifičnega odnosa ni možno odstraniti samo s kontroliranjem razmer pri nanašanju. Notranje napetosti so lahko včasih koristne, vendar pogosto ogrožajo oprijemljivost plasti s podlago. Ker je pri volframskih tankih plasteh vedno primarni interes preprečiti nastanek β -faze, je za rešitev problema notranjih napetosti treba najti druge poti.

Na koncu povejmo, da poleg že omenjenih težav pri magnetronskem nanašanju tankih plasti obstajata še dva problema, ki še vedno nista zadovoljivo rešena. Prvi je stabilizacija β -faze volframa s kisikom, ki se vgrajuje v plast med nanašanjem. V zadnjem desetletju se v literaturi pojavlja zamisel, da kisik stabilizira β -fazo, vendar sistematične raziskave na tem področju še vedno ni. Druga težava je v oprijemljivosti debelejših plasti na stekleno podlago ali podlago iz monokristala silicija. Pri plasteh, katerih debelina je večja od 300 nm, se kažejo resne težave z oprijemljivostjo na te podlage.

4 SKLEP

Volframske tanke plasti imajo zaradi svojih odličnih mehanskih in kemičnih lastnosti široko uporabo

v industriji. Magnetronsko nanašanje je zelo razširjen način njihove priprave. Žal ima ta metoda nekatere slabe strani, ki povzročajo težave z oprijemljivostjo volframske plasti na podlago in tako omejujejo njihovo uporabnost. Ta težava je tem bolj izražena, ker se volframske tanke plasti zaradi samih značilnosti materiala pogosto uporabljajo za zaščito sestavnih delov pred škodljivimi mehanskimi, toplotnimi in kemičnimi vplivi. V takšnih razmerah je vitalnega pomena močna oprijemljivost na podlage. Da bi to dosegli, se moramo izogniti nastanku metastabilne β -faze volframa že med nanašanjem plasti. Vendar je znižanje notranjih napetosti v plasti bolj zapleten problem, ki se mu ni mogoče izogniti le z nadzorovanjem parametrov nanašanja. Dodatna raziskovanja so potrebna pri analizi vpliva drugih dejavnikov, kot so nečistoče in rast plasti na meji s podlago, na pojav β -faze volframa in notranjih napetosti.

Zahvala

Zahvaljujemo se dr. Mirku Stubičarju s Fizikalnega odseka Fakultete za naravoslovje in matematiko v Zagrebu za dovoljenje za objavo fotografij ločitve tankih plasti od podlage in osebu Odseka za tanke plasti in površine Instituta "Jožef Stefan" v Ljubljani, ker so nam omogočili delo s profilometrom in pomagali z mnogimi nasveti in literaturo.

LITERATURA

- ¹J. Ligot, S. Benayoun, J. J. Hantzpergue, J. C. Remy, *Solid-State Electronics* **43** (1999), 1075-1078
- ²N. V. Plešivcev, *Katodnoe raspilenie*, Atom izdat, Moskva, 1968
- ³T. Car, N. Radić, *Thin Solid Films* **293** (1997), 78.
- ⁴A. Furlan, Utjecaj uvjeta depozicije na pojavu β -faze u tankim filmovima volframa, *Diplomska naloga*, PMF, Zagreb, 2001
- ⁵T. J. Vink, M. A. J. Somers, K. J. A. Aker, *J. Appl. Phys.* **74** (2) (1993), 988
- ⁶N. Durand, K. F. Badawi, Ph. Goudeau, *J. Appl. Phys.* **80** (9) (1996) 5021.
- ⁷P. W. Atkins, *Physical Chemistry*, 6th Ed., Oxford University Press, Oxford, 1998
- ⁸N. Radić, A. Tonejc, A. M. Tonejc, A. Furlan, P. Panjan, M. Čekada, M. Jakić, Z. Medunić, J. Ivkov, *Beta W-phase occurrence and stability in sputter deposited tungsten thin films*, v pripravi
- ⁹I. C. Noyan, T. C. Huang, R. B. York, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, **20** (1995) 2, 125
- ¹⁰M. Ohring, *The Materials Science of Thin Films*, Academic Press Inc., 1997

KAKO JE VAKUUM PRIŠEL NA KITAJSKO (Ob 300-letnici Hallersteinovega rojstva)

Stanislav Južnič

University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, ZDA

POVZETEK

Opisali smo raziskovanje vakuuma na Kitajskem. Razčlenili smo razlike med nekdanjim evropskim in kitajskim opisom praznega prostora. Posebno pozornost smo posvetili kitajskim jezuitom, ki so opazovali severni sij in prvi prinesli vakuumsko črpalko na Kitajsko. Pokazali smo pomembno vlogo, ki jo je pri prenosu evropskega znanja na Kitajsko (in nazaj) odigral Kranjec Hallerstein.

How the vacuum entered China

ABSTRACT

The early vacuum research in China is described. The differences between former European and Chinese descriptions of vacuum was brought to attention. The special concern was put on Jesuit missionaries, who observed aurora borealis and brought the very first vacuum pump to China. The important role of our scientist Hallerstein in the transport of European knowledge to China (and vice versa) was claimed.

1 UVOD

Avgusta bo minilo 300 let od rojstva Avguština Hallersteina (1703-1774), morda najpomembnejšega kranjskega znanstvenika vseh časov. Več desetletij je predsedoval astronomskega biroju v Pekingu v prestolnici države, ki je prav po njegovih izračunih prvič preseгла 200 milijonov prebivalcev. Več kot pravšnja priložnost za opis prvih stikov Kitajcev z vakuumom, h katerim je pripomogel.

2 SEVERNI SIJ

Severni sij je velikanska elektroda v katodni elektroniki. Seveda Hallerstein tega še ni vedel, kljub temu pa si oglejmo njegova opazovanja.

Najstarejši kitajski opis severnega sija je bil zapisan okoli leta 2600 pr.n.št. Kitajci so opisovali severne sije z različnimi pismenkami med letom 208 pr.n.št. in letom 1639,¹ povprečno po enkrat vsakih štirideset let. Običajno so jih označevali kot ognje ali živali, posebno zmaje.

Evropska opazovanja severnega sija so začeli načrtno zapisovati ob zori novoveške znanosti. Kepler je menil, da je korona Sonca posledica loma sončnih

žarkov v ozračju Lune. Cassini je leta 1683 nasprotno Keplerju dokazoval, da se zodiakalna svetloba enako spreminja kot sončne pege in tako na nek način oba pojava izhajata iz Sonca. Keplerjeva domneva je bila ovržena šele, ko so med popolnim mrkom leta 1860 izmerili paralakso nič,² ki je kazala, da se žarki ne lomijo med letom mimo Lune.

Leta 1621 je bil severni sij lepo viden v Evropi. Naslednje leto si je Galileo o njem dopisoval z nekdanjim učencem, konzulom florentinske akademije Mariom Guiduccijem. V pismih sta že uporabljala naziv aurora borealis. Ime je leta 1649 v znanosti dokončno uveljavil Pierre Gassendi (1592-1655), ki je prvi začel sistematično preučevati severni sij.

Sledilo je obdobje Maunderjevega³ minimuma med letoma 1650 in 1710 brez zaznavnih Sončevih peg in brez severnih sjev. Obdobje se je dramatično končalo z velikanskimi severnimi siji, ki so si jih naši predniki ogledovali po vsej Evropi od Irse do zahodne Poljske in Rusije 5. 3. 1716, 17. 3. 1716 in 18. 3. 1716. Opazoval ga je tudi tedaj trinajstletni gimnazijec Hallerstein v Ljubljani. Veličasten pojav je opredelil njegovo znanstveno pot.

Hallerstein si je pozneje dopisoval z Mairanom,⁴ ki je raziskal severni sij leta 1731 in objavil razpravo o njem dve leti pozneje. Domneval je, da je sij mešanica atmosfere Sonca in zelo razredčenega ozračja Zemlje na velikih višinah. Spreminjanje jakosti zodiakalna svetlobe je povezal s frekvenco nastalih svetlobnih sjev. Svetloba zodiaka je atmosfera Sonca, ki sveti ali pa je osvetljena z žarki Sonca. Povezavo med pegami Sonca in frekvenco severnih sjev je dokazoval s številnimi opazovanji svojih predhodnikov. Ugotovil je, da Sonce izgublja maso, kar danes imenujemo Sončev veter.⁵ Ambschell je pozneje menil, da atmosfera Sonca ne sega tako daleč, sodobna teorija pa je v bistvu sprejela Mairanove domneve.

Leta 1685 je misijonar Noël⁶ na Kitajskem opazoval zodiakalno svetlobo.⁷ Leta 1718, 1719 in 1722 so severni sij opazovali v treh različnih kitajskih provincah. Leta 1730 je Francoz Parrenin⁸ opazoval

¹ Needham, Ling, 1959, 3: 482.

² Guillermier, Koutchmy, 1999, 96–97.

³ Po greenwiškemu astronomu Eduardu Walterju Maunderju (1851–1928 (Guillermier, Koutchmy, 1999, 20)).

⁴ Francoski meteorolog Jean Jacques Dorotheus (Dortoux) de Mairan (1678–1771), član akademije v Parizu.

⁵ Guillermier, Koutchmy, 1999, 96–97.

⁶ François Noël (Wei Fang-Chi, Wei Fang-tsi, * 18. 8. 1651 Hestrud v Hainautu, danes Département du Nord; † 17. 9. 1729)

⁷ Mairan, 1754, 33.

⁸ Dominique Parrenin (Pa To-ming K'e-an, * 1665; † 1741)

severni sij na Tatarskem pri 47° do 48° severne širine. 28. 9. 1735 je iz Pekinga poročal Mairanu, da tam severni siji niso tako pogosti, kot v Parizu. Zato je komaj čakal, da mu bo Mairan poslal svojo knjigo o severnem siju, v kateri bo pojasnil tudi zodiakalno svetlobo in druge pojave. Parrenin je zelo pohvalil Mairanovo knjigo o ledu, ki je bila leta 1716 nagrajena pri akademiji v Bordeauxu,⁹ leta 1758 pa so jo v Ljubljani nabavili v nemškem prevodu. Mairanove ideje o ozračju in severnem siju so visoko cenili vsi pekinški jezuiti.

Leta 1738 je Bošković v Rimu objavil razpravo o severnem siju in dopolnil Mairanovo teorijo vpliva atmosfere Sonca na atmosfero Zemlje. V tretjem od šestih predlogov je leta 1738 uporabil opazovanja severnega sija 27. 10. 1726 Cassinijevega sorodnika Giacoma Filippa Maraldija (1665-1729) v pariškem observatoriju in Francesca Bianchinija (1662-1729) v opazovalnici na Tusculumu nad Frascatijem jugovzhodno od Rima. Njune meritve je primerjal že Mairan. Leta 1726 je Bošković opazoval severni sij kot novic v Rimu, Hallerstein pa na Dunaju, kjer je utrjeval snov s študenti matematike.

Bošković je obravnaval tudi severni sij, ki ga je profesor v Padovi markiz Giovanni Poleni opazoval ponoči 16. 12. 1737. Sij so videli v celi Evropi, Hallerstein pa je bil tedaj že v Goi. Bošković je opisal računski postopek devetnajstletnega Christiana Mayerja¹⁰ za določanje višine severnega sija nad tlemi na osnovi enega samega opazovanja, ki je bil objavljen pri peterburški akademiji. Povzel je Mairanovo teorijo, po kateri ima atmosfera Sonca zaradi vrtenja obliko bikonveksne leče in sega včasih še dlje od Zemlje. Tedaj se nahaja nad najvišjimi deli ozračja Zemlje, ki nad ekvatorjem tudi sama zažari. Pri tem se dviga in vseskozi odteka proti polom, s seboj pa vleče najbolj čist in redek zrak s snovjo atmosfere Sonca. Mairan je odtekanje pojasnil z vrtenjem Zemlje, Bošković pa ni smel zagovarjati Kopernikovega nauka. Zato je moral privzeti mirujočo Zemljo in s tem drugačen model za odtekanje.

Boškovićovo razpravo iz leta 1738 je njegov prijatelj iz reda minimov François Jacquier poslal svojemu znancu Mairanu v Pariz. Mairanu je bila posebno všeč Boškovićeva podpora njegovemu lastnemu določanju višine severnega sija, ki jo je kritiziral Serantoni v Lucci. Boškovićev model je upošteval kot dodaten vir severnega sija.¹¹ Bošković se je začel dopisovati z Mairanom, leta 1747 pa je

ponovno pisal o severnem siju v opombah k delu svojega učitelja Carla Nocetija.¹² Naslednje leto so Boškovića sprejeli v pariško akademijo, katere tajnik je bil Mairan.

Pred potresoma v Londonu 8. 2. 1749 in 8. 3. 1749 so opazili zelo pogoste severne sije izjemnih barv. Zdelo se je, da severni sij napoveduje potres, saj so Franklinova odkritja napovedovala električno naravo potresov.¹³ Iz zemlje naj bi bruhal plin severnega sija, pri tem pa naj bi manjšal količino plina, ki povzroča potres.

Leta 1741 sta Celsius in njegov študent Olav Peter Hiorter (Hjorter) v Uppsali odkrila vpliv polarnega sija na magnetno iglo. Pojav je opazil tudi Beccaria, ki je opozoril na zvoke v primerih, ko se je severni sij spustil posebno nizko v ozračju. Bergman¹⁴ je v pismu londonski kraljevi družbi 14. 4. 1761 poročal, da visok severni sij vpliva na kompas, vendar se mu ni posrečilo akumulirati električni naboj iz severnega sija.

Canton¹⁵ je leta 1753 v Londonu menil, da je severni sij iskrenje električnega ognja od pozitivnih k negativnim oblakom na velikih razdaljah skozi zgornje dele atmosfere, kjer je upor najmanjši. Severni sij naj bi povzročala naelektrenost segretega zraka nad zemljo. Najpogosteje se kaže v severnih krajih, saj so tam največje temperaturne razlike med zemljo in segretim ozračjem, še posebno ob odjugi. Snov severnega sija se mu je zdela podobna nedavno odkritemu turmalinu, ki brez upora oddaja in vpija električni fluid med ohlajanjem ali segrevanjem. Severni sij je opazoval pri laboratorijskih pogojih v zatesnjeni Torricellijevi vakuumski stekleni cevi, dolgi tri čevlje. Konec cevi je prijel z roko in nasprotni konec preko prevodnika povezal z leydensko steklenico. Celotna cev je takoj zasvetila. Ko je cev odmaknil od prevodnika, je še naprej svetila, pogosto celo četrt ure. Ko je z drugo roko povlekel po cevi v poljubni smeri, se je med rokama še bolj zasvetila. Pri tem se je cev razelektrila; v presledkih pa je še vedno svetlikala, če jo je nepremično držal le na enem koncu. Ko se je cevi dotikal s prosto roko, je izvabljal močne iskre svetlobe tudi štiriindvajset ur po naelektritvi. Z majhnimi vakuumskimi posodami nepravilnih kotov in ukrivljenosti je v temi odlično ponazoril bliskanje ob streli.¹⁶

Med letoma 1756 in 1759 je Canton nadaljeval Bergmanova opazovanja motenj kompasa ob jasnih

⁹ Aimé-Martin, 1843, 3: 698; Mairan, 1754, 460, 464, 465.

¹⁰ Christian Mayer (* 20. 8. 1719 Modric pri Brnu; † 1783 Mannheim).

¹¹ Marković, 1968, 1: 79–80.

¹² Marković, 1968, 1: 208. Carlo Noceti (*1694 Bagnone; †1759).

¹³ Priestley, 1765, 1: 448.

¹⁴ Tobern Olof Bergmann (* 1735 Katrineberg; † 1784 Uppsala).

¹⁵ Anglež John Canton (1718–1772).

¹⁶ Priestley, 1765, 2: 162–163; Ambschell, 1807, 2: 124.

severnih sijih in odkril pojave, ki jih danes imenujemo magnetni viharji. Uganil je, da so električni naboji visoko nad oblaki,¹⁷ kjer jih je pozneje raziskoval Appleton.

17. 9. 1770 je Hallerstein opazoval severni v Pekingu pri 39,54 stopinjah severne širine. Peking leži nekaj stopinj južneje od Slovenije, zato je tam severni sij redko viden in ga v tako popolni Hallersteinovi obliki niso opazovali niti v najstarejših časih. Sij se je pred 19^h namesto somraka prikazal najprej na severnem obzorju. Nato je njegova rdeča barva postopoma krenila proti zahodu. Po jasnem nebu se je polagoma dvigoval in širil proti vzhodu in zahodu. Ob 19^h se je polovica sija kazala na obzorju kot škrlatni obroč ali celo krogla škrlatne barve. Po 20^h se je sij nižal in redčil. Proti 21^h se je znova zgostil in se okoli 22^h dvignil. Visel je na obzorju pod kotom 40° glede na navpičnico in se pomikal proti zvezdi Severnici.¹⁸ Proti zahodu je pokrnil zorni kot skoraj 100° in prav toliko proti vzhodu, tako da je bil skupaj širok 200°. Razredčena škrlatna barva se je dvignila skoraj do višine dreves, kot da bi izvirala iz središča za obzorjem. V smeri navpičnice je bil sij nekoliko raznobarvno rdeč brez bledih barv. Dobro so se videle spremembe sija kot redčenje in zgoščevanje, oslabitev in ojačitev, daljšanje in krajšanje, navpično proti nebu ali proti jugu.

Peščico tridesetih ali štiridesetih ognjenih žarkov so Hallerstein in sodelavci opazovali kot v gledališču. Pozneje se je celoten sij premaknil proti obzorju in obenem dvignil. Rdeči del sija se je povzpел proti severu. Pod njim se je pokazal na obzorju temnejši sij z mešanico modre in rumene barve na golem nebu. Visoko se je vzdignil, rasel in vedno bolj temnel. Žarki so bledeli, se redčili in izginjali v vetru. Slednjič je zavladała temna noč, po polnoči še vedno nekoliko rdeča na vzhodnem obzorju. Nekateri deli sija so se jasno videli še do druge ure zjutraj.

Medtem ko je pisana svetloba izginjala, se je Hallersteinu pojav zdel podoben priljubljenim kitajskim proslavam z ognjemeti. Pojavilo se je osem ali deset vprašanj, katerih odgovore so pekinški astronomi poiskali v knjigah, ki trdijo, da so na zemljepisnih širinah, manjših od 40°, severni siji res redko vidni. Tudi vetrovi so v tem podnebjju ovira za opazovanje severnega sija.

Cesar je pekinškim astronomom posebej ukazal raziskovanje severnega sija. Pri tem so upoštevali

naravne zakonitosti, objavljene v zgodovinskem kitajskem delu "Mreža sijajnega severnega ognja" (Pefang-ho-guang). Hallerstein je zagotovil, da bo o tem delu poročal v naslednjem pismu,¹⁹ ki ni bilo objavljeno.

Istočasno s Hallersteinom je pri francoskem kolegiju severni sij opazoval tudi njegov prijatelj Amiot.²⁰ Opisal je severni sij, ki so ga spremljali zelo svetli trakovi svetlobe. Devetnajst dni po opazovanju je poročilo skupaj z drugim gradivom poslal v Pariz, kjer so ga objavili več kot dve leti pozneje.²¹

Amiot je opazoval v Haitianu (Hay tien, Hai Tien) blizu cesarjeve počitniške hiše dve milj (lieues) daleč od Pekinga. Aurora je imela zelo živo rdečo barvo. Točno na severni strani neba je pokrivala kot okoli 30°. Sij se je postopoma razširil za 1° proti vzhodu in zahodu in se nato ustalil. Ko je ob pol deveti uri Amiot začel opazovati, je bilo nebo zelo mirno, proti deveti uri pa se je napolnilo s parami.²² Pare so se sčasoma spustile nižje, sij pa se je še polepšal. Sredi rdeče barve so sijali žarki svetlobe in se razprostirali v daljavo. Proti tretji uri zjutraj je pojav izginil. Isti sij je bil ponovno viden 20. 9. 1770 ob deveti zvečer, vendar z mnogo manj sijaja kot tri dni prej, saj so nebo prekrivali oblaki. 22. 9. 1770 ob pol osmi uri zvečer je Amiot opazoval žarke blede barve, ki so pokrivalo nebo od severovzhoda do jugozahoda. V drugih delih svojega poročila je Amiot opisoval kitajske in tatarske knjige.

17. 9. 1770 so severni sij opazovali tudi v Burgundiji, Parizu, Montmorenciju, Gurzelenu, Dunaju, Lübecku in v Boeringenu (Böringenu) izjemoma na južni strani neba. Cotte²³ je opazoval v Montmorenciju 17. 9. in 18. 9. 1770. Zaznal je izredno velik vpliv severnega sija na magnetno iglo. Bil je zelo vlažen jesenski dan, tako da je že pred nočjo magnetna igla močno nihala. Deklinacija se je spreminjala za pol stopinje. Cotte je odstranil vse kjuče in vso železo, saj je mislil, da z njim moti kompas. Vendar je bilo nihanje igle kljub temu vidno. Ob pol osmi uri je opazil trak svetlobe, ki je pokrival nebo od zahoda do zenita. Kratkotrajni pojav se je razvil v majhen severni sij, ki ga je v vsem sijaju opazoval Hell na Dunaju. Podobno močan vpliv severnega sija je Cotte opazil v Monmorenciju le še 29. 2. 1780 in 28. 7. 1780.²⁴

16. 9. 1770 je kapitan Cook med svojim prvim potovanjem z ladjo Endeavour opazoval južni sij ob 22^h pri 10° južno od ekvatorja pri otoku Timor severno

¹⁷ Priestley, 1765, 1: 34, 285, 389, 410, 436–437, 2: 75.

¹⁸ Hallerstein, 1772, 16: 250.

¹⁹ Hallerstein, 1772, 16: 251.

²⁰ Jean-Joseph-Maria Amiot (Ts'ien té-ming jo-ché, * 8. 2. 1718 Toulon; † 8/9. 10. 1793 Peking)

²¹ Amiot, 1773, 2: 111–112.

²² Cotte, 1788, 340, 344.

²³ Louis Cotte (* 1740 Laon; † 1815 Montmorenc (Montmorency)), dopisni član pariške akademije.

²⁴ Angot, 1896, 199; Fritz, 1873, 72; Cotte, 1788, 1: 343–344.

od Avstralije. Pojav sta v dnevniku zabeležila Cookov Sidney Parkinson in botanik Joseph Banks (1743–1820), poznejši predsednik kraljeve družbe. Sij je pokrival 20° horizonta z zornim kotom najmanj 90° ali 100° . Svetloba je bila vseskozi živa brez vibracij, središče loka aurore pa je mirovalo v smeri jug-jugozahod.²⁵ Iste dne, 16. 9. 1770, so sij opazili v grofiji Ji-Zhou kitajske province Hebei pri $40^\circ 1'$ severne širine in $117^\circ 4'$ vzhodno, torej le malo severovzhodno od Pekinga. Pojav so opazovali tudi v kitajski provinci Shadong nekaj stopinj južneje. V siju je prevladovala rdeča barva. 16. 8. 1770 na Japonskem niso opazili severnega sija, zato pa so 17. 9. 1770 pojav opazovali v petnajstih japonskih krajih. Korejcem je močan dež onemogočil opazovanja.

Hallersteinov severni sij iz leta 1770 je bil tako prvi v zgodovini, ki so ga dokumentirano opazovali na obeh poloblah. Pojav se je pokazal skoraj natančno eno leto po maksimalnemu številu sončnih peg leta 1769.

Hell je 17. 9. 1770 od 19^h dalje opazoval severni sij na Dunaju pri $48^\circ 4'$ severne zemljepisne širine. Torej je opazovanje pričel le nekaj minut za Hallersteinom po lokalnem času. Manjkala sta še dva dneva do nove Lune (prazna Luna, mlaj), ki je nastopila 19. 7. 1770 ob 8^h. Zorni kot severnega sija ob polnoči ni več presegal $48^\circ 4'$. Svetilnost severnega sija je presegala svetilnost Sonca, ko je bilo Sonce 60° pod obzorjem.²⁶ Pojav je potrjeval Hellovo domnevo o izjemni jakosti severnega sija, ki je bil v Pekingu viden vso noč.

Hell je Hallersteinovo poročilo objavil v prvem delu splošnih efemerid, v katerem je poročal tudi o Tirnbergerjevih²⁷ opazovanjih Jupitrovih satelitov. V sto šestnajst strani dolgemu dodatku je v nadaljevanju poročal o opazovanju paralakse Sonca in o prehodu Venere leta 1769.

Leta 1776 je Tirnberger poročal o opazovanju severnega sija v Gradcu pri $47^\circ 4'$ severne širine. Opazoval je devet mesecev pred Hellom in Hallersteinom. 14. 12. 1769 je začel opazovati ob 21. uri, 27. 12. 1769 pa pol ure prej, 30. 12. 1769 je začel meriti ob pol šestih zjutraj in opazovanja nadaljeval naslednjo noč, 31. 12. 1769. Drugače kot Hell in Hallerstein ni opazoval le svetlobe, temveč je pojav meril tudi z magnetno iglo. Igla se je premaknila proti vzhodu, ko so ob močnem vetru hudourni oblaki prekrili nebo nad gorovjem. S posebno napravo je



Hallersteinov severni sij iz leta 1770, kot ga je narisal opazovalec v Parizu (Angot, 1896, str. 24/25)

meril zasuk magnetne igle in ugotovil, da igla niha pod kotom 35° , odklonjena od smeri severa.²⁸

Leta 1769 je po desetih letih zelo redkih severnih sije, vidnih med 46° in 55° širine pojav postal pogostejši za poltretje desetletje. Leta 1769 so imele tudi pege na Soncu maksimum, saj so jih opazili 106, več kot kdaj koli prej. Vendar o Tirnbergerjevem severnem siju ni bilo drugih poročil, niti ga ne omenjajo poznejši popisi opazovanj. Najbliže mu je bilo opazovanje severnega sija na gradu Deainvilliers 20. 12. 1769, ki je bilo objavljeno pri pariški akademiji. V Gradcu in na Dunaju so severni sij opazili 24. 10. 1769, na Dunaju, v Trnavi in v številnih nemških krajih pa 18. 1. 1770.²⁹

Astronom Tirnberger je opazovanje severnega sija objavil med meteorološkimi meritvami. Leta 1768 in 1769 je meril relativno vlažnost zraka,³⁰ med letoma 1765 in 1768 pa veter, oblačnost, povprečni tlak in temperaturo po posameznih mesecih.³¹ Ugotavljal je, da so bila najvišja dnevna nihanja temperature aprila 1769.³² Zapisal je podatke o dveh potresih, 31. 12. 1767 ob 12³⁰ in 27. 2. 1768 ob 2⁴¹, ki ju ni posebej povezoval s severnim sijem.³³

Severni sij je zanimal številne jezuite in druge astronome. Zato je Hell leta 1777, pet let po objavi Hallersteinovega opisa severnega sija, celoten dodatek k efemeridam posvetil severnemu siju. Razpravo je napisal v obliki poučnih ugotovitev, predpostavk in dokazov, podobno kot skoraj stoletje prej Newton v Principih. Hell je objavil sto petindvajset točk na sto

²⁵ Cotte, 1788, 339.

²⁶ Hell, 1772, 16: 252; Gazette de France, 1. 10. 1770.

²⁷ Karl Tirnberger (Tirnberger, * 27. 10. 1731 Ptuj; † 1780 Schottwein v Dolnji Avstriji).

²⁸ Tirnberger, 1770, 33.

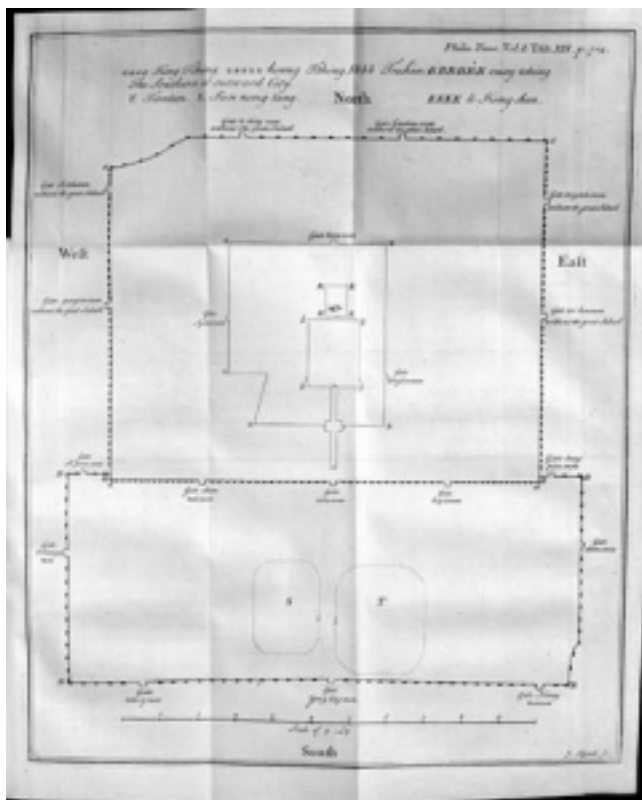
²⁹ Angot, 1896, 95, 97 199; Fritz, 1873, 72.

³⁰ Tirnberger, 1770, 35.

³¹ Tirnberger, 1770, 7–16.

³² Tirnberger, 1770, 14.

³³ Tirnberger, 1770, 34–35.



Načrt Pekinga z južnim delom mesta in templjem neba (T). Jezuiti so večinoma uporabljali stavbe na sredini zemljevida (Gaubil, Antoine. 1759. *A Description of the Plane of Peking, the Capital of China; sent to the Royal Society by Father Gaubil, e Societate Jesu. Translated from French. Phil.Trans. 1758. 50/2: 704/705, Tabla XXV*).

osemnajstih straneh z več slikami. Opisal je razvoj raziskovanja pri Kircherju, Mairanu, Musschenbroeku in Johnu Lambertu (1728–1777) v fotometriji leta 1761. Omenil je matematično določanje višine severnega sija³⁴ in opazovanje na Novi Zemlji v Rusiji.³⁵ Uporabil je svoje raziskovanje magnetizma v zdravilstvu in severni sij povezal z električnim nabojem Zemlje.³⁶ Leta 1769 je Hell opazoval prehod Venere na Laponskem, kjer je pogosto opazoval severni sij. Svoje ugotovitve je strnil v pet točk.³⁷

1. Snov, ki odbija severni sij, je veliko gostejša od tiste, ki se pojavlja v naših krajih.
2. Opazimo zelo živahno svetlobo.
3. V osvetljenem prostoru severnega sija opazimo številne hitre delce.

³⁴ Hell, 1777, 21: 112.

³⁵ Hell, 1777, 21: 54.

³⁶ Hell, 1777, 21: 8, 115.

³⁷ Hell, 1777; Ambschell, 1807, 2: 123.

³⁸ Cotte, 1788, 334.

³⁹ Ambschell, 1807, 2: 128–129.

⁴⁰ Pouillet, 1853, 2: 791.

⁴¹ Akasofu, 2002, 44–45.

⁴² Guillermier, Koutchmy, 1999, 25, 100–101.

⁴³ Hannes Olof Gösta Alfvén (1908–1995).

4. Ob redčenju severnega sija blede njegova zlato, rumena barva. Pri tem se pojavljajo barve, ki jih opazimo po lomu na prizmi.
5. Južno nebo je med severnim sijem navadno skoraj temno.

Leta 1778 je Mako objavil razpravo o električni naravi severnega sija.³⁸ Nekdanji ljubljanski profesor Anton Ambschell (1751–1821) je sprejel Mairanovo (1733) in Hellovo mnenje, da severni sij nastane po odboju svetlobe Sonca in Lune na delcih ledu pod obzorjem. V njegovem času je bilo že jasno, da se podobni pojavi kažejo tudi pri južnem polu.³⁹

V drugi polovici 19. stoletja so začeli intenzivno raziskovati prevajanje elektrike skozi razredčene pline, ki sveti v visokih delih ozračja. Večina raziskovalcev je soglašala, da ta sij povzročajo dvigajoči se električni naboji, vendar so ponujali različne razlage. Faraday je leta 1850 obravnaval odvisnost severnega sija od magnetnih lastnosti atmosfere in objavil veliko meritev svojih sodelavcev. "Magnetna sestava kisika in magnetno stanje atmosfere" ter njene letne in dnevne spremembe so se Faradayu zdele posebno pomembne. Čeprav majhne, naj bi gotovo vplivale tudi na magnetizem Zemlje, kot je sočasno leta 1850 domneval E. Becquerel. Pariški akademik Claude Pouillete (1791–1868) je imel številne različne teorije severnega sija za dokaz, kako malo raziskovalci vedo njem.⁴⁰

Norveški profesor Olaf Kristian Birkeland (Olaf, 1867–1917) je med letoma 1908–1913 severni sij povezoval s "katodnimi žarki" po vzoru na opis Davyjeve obločnice Françoisa Aragoja (1786–1853) iz leta 1820. Birkeland je skupaj z asistentom Olavom Devikom v Oslu v veliki vakuumski posodi poskušal ustvariti auroro na železni krogli, ki jo je po Gilbertovem vzoru imenoval Terella. Zaradi Birkelandovih poskusov se je za severni sij začel zanimati tudi norveški matematik Carl Störmer (1874–1957) leta 1907 in 1911.⁴¹ Izkazalo se je, da skupaj z elektroni tudi protoni s Sonca interagirajo s kisikom in dušikom zgornjih plasti ozračja Zemlje pri tvorbi severnega sija.⁴² Raziskovanja norveških profesorjev je nadaljeval Alfvén⁴³ z dokazom, da severni sij nastaja zaradi radioluminiscence nabitih delcev, ki jih seva Sonce v visoke plasti atmosfere Zemlje.

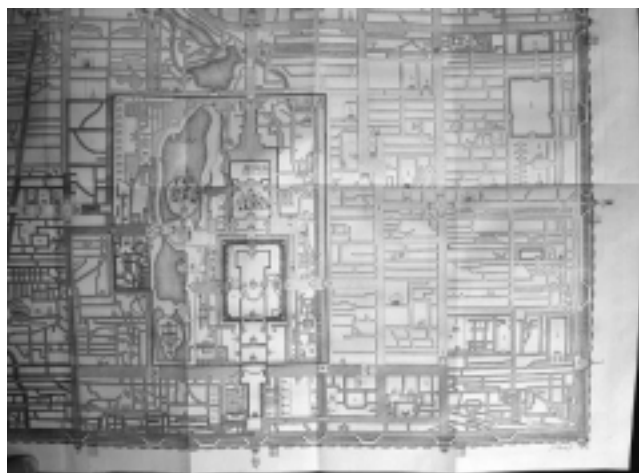
Aurora je največja vakuumaska razelektritev, v kateri elektroni s Sonca letijo kot katodni žarki.

Celotna zgornja plast ozračja je katodna elektronka. Ozračje je na višinah, kjer nastajajo aurore, razredčeno do visokega vakuumu. Zelo hitri elektroni s Sonca trkajo ob molekule in atome. Dušikove molekule se ionizirajo in oddajajo vijolično in ultravijolično svetlobo. Sekundarni elektroni, izbiti iz dušikovih molekul, imajo dovolj energije, da izbijejo elektrone iz kisikovih molekul, ki oddajo belo-zeleno svetlobo. Če imajo vpadni elektroni dovolj energije, se spodnji del aurore spusti tudi do 88.500 km. Tam imajo elektroni že premalo energije za ionizacijo dušikovih molekul, lahko pa jih spravijo v višje energijsko stanje. Po vrnitvi v osnovno stanje dušikove molekule oddajo fotone škrlatno rdeče barve v spodnjem delu aurore. Ultravijolični in vijolični del spektra aurore se absorbira v zgornjih plasteh ozračja, še preden pride do Zemlje.

Študij auror nebesnih teles omogoča raziskovanje njihovoga ozračja. Zelenkaste aurore kažejo kisik na posameznih planetih. Vendar imata tako Mars kot Venera zaradi vodika vijoličasto auroro,⁴⁴ zato je tam bržkone zelo malo Marsovcev oziroma Venerijancev.

Vakuumska črpalka v Peking

Med najpomembnejšimi Hallersteinovimi sodelavci v Pekingju je bil Benoît.⁴⁵ Študiral je v Dijonu in v Parizu. Tri leta je ponavljal prošnje za odhod v kitajske misijone, dokler mu ni sekirica končno padla v med. Pred odhodom je moral v Parizu dokončati astronomske študije pri Delislu,⁴⁶ Lacaille⁴⁷ in Le Monnierju.⁴⁸ Z njimi se je pozneje veliko dopisoval iz Kitajske. V Pekingju je prispel 12. 7. 1744, naslednje leto pa je dobil naziv cesarskega matematika⁴⁹ in trideset let služil pod cesarjem Ch'ien-lungom.⁵⁰ Ob Benoïtovem prihodu v Peking so misijonarje tam sicer preganjali, a si je s svojim znanjem zagotovil nepogrešljivost na dvoru. Zadolžili so ga za izdelavo velikega sistema okrasnih vodomotov v cesarskih vrtovih.⁵¹ Na projektu je z velikim uspehom delal več let. V vrtovih je gradil evropske hiše, pred eno v italijanskem stilu pa je postavil zanimivo vodno uro. Uporabil je lokalne motive. Mandžurci so štiriindvajset ur dneva zaznamovali z dvanajstimi živalmi različnih vrst. Na dveh straneh trikotnega zbirališča vode je Benoît postavil kipe teh živali. Z mehansko napravo je vsaki dve uri vodo potiskal iz ust druge živali. Francoski kralj Ludvik XV je Benoïtu naročil izdelavo dodatnih kopij šestnajstih bakrorezov



Severni del prejšnje slike. Najpomembnejše za znanost so bile naslednje stavbe: manjši observatorij (70); hiša in cerkev francoskih jezuitov, postavljena leta 1703, ter observatorij postavljen leta 1731 v severnem območju Beitang (81); stavba, kjer so učenjaki opravljali izpite (Kong yuen, 107); cesarski observatorij, v katerem je Hallerstein opazoval severni sij, povsem spodaj na desni (jugovzhodni) strani z zastavo za merjenje smeri vetra (gu guanxiang tai, 108); tribunal izbranih doktorjev imperija, od katerega so bili odvisni vsi učenjaki, kolegiji in šole (Han lin yuen, 128); biro za astronomijo izza stavbe tribunala običajev in ceremonij v palači, zgrajeni leta 1442, popravljani leta 1766 in pozneje odstranjeni na današnjem jugovzhodnem delu trga Tian An Men (Urad za nebo, Qintian jian, 136); tribunal mandarinov (Ly pou, 137); tribunal običajev (Libu, 139), cesarski kolegij (Kuo-tzu Chien, 180). Prva vzhodna portugalska hiša in cerkev Dontang sta bili postavljeni za blok vzhodno od prepovedanega mesta. Druga hiša s cerkvijo sta stali južno od cesarske palače Nuntang, kjer so cesarju kazali delovanje vakuumske črpalke (170, 248). (Gaubil, 1759, Tabla XXIV)

cesarskih bitk. Benoît je zato izumil nove metode močenja papirja in porazdelitve črnila. Postal je vodja francoskih jezuitov v Pekingju.

Hallerstein in Benoît sta skupaj poučevala kitajska jezuita Stephana Janga (Etienne Yang) in Aloisa Kuoja (Pierre Ko), ki so ju leta 1751 poslali na šolanje v Francijo. Leta 1753 sta Hallerstein in Benoît sodelovala v Pekingju pri opazovanju prehoda Merkurja čez ploskev Sonca. 4. 9. 1766 je Hallerstein poročal bratu v Bruselj, da mu je Benoît podaril Hellove eferide iz leta 1761, ki so vsebovale tudi Hallersteinova opazovanja prehoda Venere čez Sonce.

Benoît je bil prvi jezuit, ki je v palači poučeval po Kopernikovem sistemu, ki ga je predstavil cesarju leta 1760.⁵² Obenem je predstavil svoj zemljevid na osnovi Hallersteinovih in drugih meritev, ki ga je pregledal

⁴⁴ Akasofu, 2002, 58, 64, 65.

⁴⁵ Michel Benoît (Benoist, Tsiang Yeou-Jen Tö-Yi, * 8. 10. 1715 Dijon; † 23. 10. 1774 Peking).

⁴⁶ Parižan Joseph Nicolas Delisle (De L'Isle, 1688–1768), član pariške akademije od leta 1714.

⁴⁷ Abbé Nicolas Louis de Lacaille (* 1713 Rumigny; † 1762 Pariz), član pariške akademije od leta 1741.

⁴⁸ Pierre Charles Le Monnier (Lemonnier, 1715–1799).

⁴⁹ Aimé-Martin, 1843, 4: 122; Benoît, pismo iz Pekinga Papillonu d'Auterochu 16. 11. 1767.

⁵⁰ Ch'ien-lung (* 1711; † 7. 2. 1799 Peking) cesar 1736–1796.

⁵¹ Hallersteinovo pismo 28. 11. 1749; Pray, 1781, 28–29.

zelo sposoben matematik, cesarjev stric. Nove francoske tabele za napovedovanje nebesnih pojavov so začeli uporabljati namesto dotedanjih Halleyjevih, Lemonierjevih in Grammaticovih.⁵³ Vendar so Kitajci sprejeli predvsem rezultate novih metod, manj pa njihove heliocentrične principe. Benoîtov zemljevid (Di Qiu Tu Shuo) so kot popravek vnesli v dotedanje zemljevide.⁵⁴ Hallerstein je zagovarjal geocentrični sistem, ki je prevladoval na Kitajskem. Zaradi oddaljenosti od evropskih središč mnenja za razliko od francoskih jezuitov v Pekingu ni javno spremenil niti po kongregaciji leta 1756, ko so katoliki lahko prosto zagovarjali heliocentrični nauk. Kitajci so si predstavljali prazen medzvezdni prostor brez trdnih kristalnih sfer Ptolomejevega sistema. Tako v njihovem opisu sveta ni bilo nikakršnih zadržkov pred praznim, sploh pa ne "strahu pred vakuumom" ki je plašil evropske raziskovalce pred Torricelijevim izumom barometra, mnoge pa še pozneje.

Problem medzvezdnega prostora je zelo zanimal Hallersteinovega dunajskega korespondenta Hella, ki je o njem objavil knjigo leta 1789. Razprava o obstoju vakuuma je bila v Evropi živa še v času Hallersteinove mladosti. Vakuum v barometru, črpalki ali medzvezdnem prostoru je kljuboval tako Aristotelovi, kot Descartesovi fiziki.

Jezuiti so ob zastarelih ekvatorialnih koordinatah Kitajcem prinesli tudi Ptolomej-Aristotelovo geocentrično vesolje s trdnimi kristalnimi sferami, kar se je s Tycho in Kopernikom prav tedaj opuščalo v Evropi. Od tod so izvirale tudi deloma upravičene kitajske kritike jezuitske astronomije.⁵⁵ Kopernikov nauk so morali kitajski jezuiti po Galilejevem procesu opustiti, tako da je bil na Kitajskem sprejet šele konec 18. stoletja,⁵⁶ desetletja po letu 1756, ko ga je kongregacija sicer dovolila uporabljati v katoliških deželah.

Benoît in Hallerstein sta bila pogosto klicana na pogovore k cesarju. Nekoč je cesar vprašal Benoîta, ali vsi evropski astronomi verjamejo v gibanje Zemlje. Benoît je potrdil, da "skoraj vsi, vendar ne gre toliko za resničen sistem, temveč predvsem za boljši način preračunavanja gibanja nebesnih teles". Cesar je med obedom spraševal tudi o lastnostih evropskih vin in

Benoît mu je kot Francoz stare šole z veseljem postregel z vsakovrstnimi podatki.⁵⁷

12. 1. 1773 je Le Fevre,⁵⁸ vodja jezuitov v Kantonu, pomagal dvema novima francoskima misijonarjema pri prevozu odličnega novega teleskopa, številnih daril in prve vakuumske črpalke v Peking. Nova menih urar Méricourt⁵⁹ in umetnik Panzi⁶⁰ sta se po nalogu francoskega ministra Bertina⁶¹ naučila ravnanja s črpalko, preden sta odjadrala proti Kitajski.

Šest dni po njunem prihodu je cesar ukazal, naj črpalko prenesejo v stavbo Jou-y-koan, v kateri so delali evropski umetniki. Benoît in Sichelbarth sta dobila nalogo, naj pomladi črpalko predstavita cesarju in pojasnita njeno delovanje.

Benoît je nekaj mesecev pripravljaj črpalko za demonstracijo. Kitajcu je pojasnil način uporabe, da mu je lahko pomagal pri delu. Za cesarja je izbral najbolj zanimive poskuse, jih narisal na plošče z bakrorezi in pojasnil v majhni knjižici. Črpalko je shranil v prostor s kontrolirano temperaturo, da bi ji ne škodilo tedanje zimsko vreme. Méricourt in Panzi sta naučila evnuhe ravnati s črpalko, njuna navodila pa je prevajal Yuen-Ming-Yuen.

Benoît je naučil cesarja uporabljati novi refleksijski teleskop. Tudi cesarski evnuhi so med obedom pohvalili njegovo delovanje. Cesar je takoj ugotovil prednosti refleksijskega teleskopa pred tistimi, ki jih je do tedaj videl v Hallersteinovih opazovalnicah.⁶²

Trije misijonarji Méricourt, Archange in Ventavon so v urarski delavnici sestavili vse dele črpalke. Pri prvih vakuumskih poskusih 10. 3. 1773 v Jou-y-koanu so štirje evnuhi poganjali črpalko. Bili so navdušeni, ko jim je Benoît pokazal stiskanje, raztezanje in druge lastnosti zraka. Ob osmi uri zvečer je cesar zahteval pojasnila za vse rezultate poskusov. Seznanil se je z notranjostjo črpalke in z deli, ki so bili skriti znotraj naprave. Benoît mu je moral razložiti pomen številnih bakrorezov, ki so bili priloženi kot navodila za delovanje. Cesar je ukazal ponoviti vse poskuse iz Jou-y-koana, ki so jih zanj priredili evnuhi. Naslednji dan, 11. 3. 1773, so evnuhi poročali Benoîtu, ko je prišel v Jou-y-koan. Natančno so opisali dogodke, ki so se vrstili prejšnjega dne pri cesarju.

Cesar je zahteval pripravo novih poskusov. Zato je Benoît dal razstaviti črpalko, da bi pregledal, če so vsi

⁵² Kopernikanski sta bili že Planisfera Sabbatinusa de Ursisa (1575–1620) iz leta 1611 in astronomija Emmanuela Diaza (Yang ma-No, 1574–1659) iz leta 1615, ki je upoštevala Galilejeva teleskopska odkritja.

⁵³ Nicholas Grammatici (* 1684; † 1736).

⁵⁴ Aimé-Martin, 1843, 4: 122; Benoît, pismo iz Pekinga Papillonu d'Auterocheju 16. 11. 1767.

⁵⁵ Needham, Ling, 1959, 3: 438765.

⁵⁶ Needham, Ling, 1959, 3: 443–444.

⁵⁷ Aimé-Martin, 1843, 4: 217, 220; Benoît, pismo 4. 11. 1773.

⁵⁸ Joseph-Louis Le Fevre (* 30. 8. 1706 Nantes; † pred 1780 v Franciji).

⁵⁹ Oče Hubert de Méricourt (Li Tsuen-Hien Si-Tschen, * 1. 11. 1729 Francija; † 20. 8. 1774 Peking).

⁶⁰ Brat Joseph Panzi (Pansi, P'an T'ing-Tchang, Jo-Ché, * okoli 1733 Italija; † pred 1812 Peking).

⁶¹ Henri-Léonard-Jean-Baptiste Bertin grof de Bourdeilles (* 24. 3. 1720 Périgueux; † 1792 Spa v Belgiji) častni član pariške akademije (Amiot, 1774, 519).

⁶² Aimé-Martin, 1843, 4: 196–198, 208; Benoît, pismo 4. 11. 1773.

deli v dobrem stanju. Dopoldne je razložil cesarju uporabo različnih ventilov, velike pipe nasproti bata in zunanjega varnostnega ventila, ki sta branila prehod zunanjega zraka v recipient. Ko je bil cesar seznanjen z vsemi deli črpalke, je vprašal, če lahko začno s poskusi. Za pripravo je bilo potrebno nekaj časa, ki ga je cesar izkoristil za tisoče vprašanj, kot je bila pri njem navada.

Benoît je cesarju predstavil enaindvajset izbranih poskusov. Prvih šest je dokazovalo tlak zraka. Poskusi so se vrstili drug za drugim. Medtem ko je cesar poslušal razlago prejšnjega poskusa, so že pripravljali naslednjega. Benoît je v sobano prinesel tudi barometer in termometer. Cesar je postavil več vprašanj o načinu, kako zrak zniža gladino živega srebra v barometru, kako dvigne vodo v črpalki in zakaj je sprememba tlaka sorazmerna s spremembo višine živega srebra. Benoît mu je postregel z razlagami, ki so bile tedaj v navadi v Evropi. Opozoril ga je tudi, da se teža zraka spreminja glede na vremenske pogoje.

V drugi skupini poskusov je Benoît dokazoval elastičnost in stisljivost zraka. Ti poskusi so se cesarju še posebno priljubili.

Črpalko je Benoît med prvimi poskusi v Jou-y-koanu hotel imenovati "cev za raziskovanje zraka", v kitajščini yen chhi thung oziroma Nien-ki-tung po starem francoskem zapisu. Cesar je menil, da je treba uporabiti besedo hou (Heou v francoskem zapisu) namesto yen (Nien v francoskem zapisu). Beseda se mu je zdela bolj plemenita, uporabljena v klasičnih kitajskih knjigah za opis nebesnih opazovanj, za opazovanja pri določanju poljedeljskih dejavnosti in spreminjanju letnih dob. Tako je cesar izbral naziv "cev za opazovanje zraka", hou chhi thung oziroma Heou-hy-tung v starem francoskem zapisu.

Ob koncu predstavitve črpalke se je cesar zahvalil svojim ženam in drugim damam, ker so prisostvovale poskusom. Po zelo dolgi predstavitvi, med katero je vseskozi stal v bližini črpalke, se je vrnil v svoje prostore in ukazal, naj za njim odnesejo tudi črpalko. Benoîta, Méricourta in Panzija je bogato obdaril s tremi velikimi kosi svile.⁶³

Tako je vakuum vdrl na Kitajsko. Vendar Hallerstein in njegovi sodelavci niso utegnili postaviti veliko novih poskusov. Naslednje leto je Benoît umrl po kapi, le nekaj dni pred dvanajst let starejšim Hallersteinom.

SKLEP

Hallerstein je odrasel na Kranjskem, ki je ob Kitajski komajda pika na zemljevidu. Prav nič se ni počutil majhnega in se je uveljavil v samem vrhu kitajske znanosti. S svojimi raziskavami vakuumskih razelektritev ob severnem siju in vakuumske črpalke je skupaj s sodelavci utrl pot sodobni kitajski vakuumski industriji. Nedvomno bi bilo lepo in prav, da bi se slovenski vakuumisti še nadalje uveljavljali v Pekingu po Hallersteinovih stopinjah, saj je Kitajska gotovo trg, ki največ obeta.

LITERATURA

- Aimé-Martin, M. L. 1838, 1843. *Lettres édifiantes et curieuses concernant l'Asie, l'Afrique et l'Amérique. I.* Pariz: Auguste Desrez. II-IV. Pariz: Société du Panthéon Littéraire.
- Akasofu, Syun-Ichi. 2002. Secrets of the Aurora Borealis. *Alaska Geographic*. 29/1: 1-111.
- Amschell, Anton. 1807. A.A. Amschell in Universitate Vindobonensi AA.LL. ac Philosophiae Doctoris, Facultatis ejusdem Senioris, Physicae et Mechanicae Professoris Caes.Regii Publici et Ordinarii Elementa Physicae e Phaenomenis et Experimentis Deducta, aut Auditorum Conscripta, ac in Dissertationes Sex Divisa. Vienna: Sumtibus Aloysii Doll, Bibliopola.
- Amiot, Joseph Maria. 1773. Extrait d'une Lettre du P. Amiot dans laquelle il trace le plan que les Chinois suivent dans leurs études, & de quelques autres Ecrits du même Missionnaire, du 6 Octobre 1770. *Journal des Savants*. Februar. 2: 97-130. (Vsebuje tudi razpravo: *Aurore Boréale*. 2: 111-112, ki jo je Cotte (1788, 344) napačno citiral kot: *Journal des Savants*, Januar 1773, str. 41).
- Amiot, Joseph Maria. 1774. Observations météorologiques. Faites a Pékin, par le P. Amiot, Décembre 1762. Mis en ordre par M. (Charles) Messier. *Mémoires de mathématiques et de physique, présentés à l'Académie Royale des Sciences*. 6: 519-601.
- Angot, Alfred. 1896. *The Aurora Borealis*. London: Kegan Paul, Trench, Trübner & Co. Ltd.
- Cotte, Louis. 1788. *Mémoires sur la météorologie*. Paris: Imprimerie royale. I-II.
- Fritz, Hermann. 1873. *Verzeichniss Beobachter Polarlichter*. Wien: Gerold's Sohn.
- Guillermier, Pierre, Koutchmy, Serge. 1999. *Total Eclipses: Science, Observations, Myths and Legends*. Berlin: Springer.
- Hallerstein, Avguštín. 1772. Lucis borealis Pekini sub Elevatione Poli 39.54 a R. P. Hallerstein observatam. *Hell, Ephemerides astronomicae* 1772, Viennae 1771. 16: 250-251.
- Hell, Maximilian. 1761-1777. *Ephemeridae Astronomicae Ann. ad Meridianum Vindobonnensem jvssv Avgvstorvm calculis definitae a P. Maximiliani Hell e S. J. Astronomo caesareo-regio Universitatis Vindobonensi. -Anni Bissexti.Vienae. Typis et sumtibus Joannis Thomae de Trattner; caes. Reg. Maj. Av.Typographi et Bibliop.*
- Mairan, Jaen-Jacques Dortous de. 1731. *Traité physique et historique de l'Aurore Boréale*. Mémoires de l'academie. Ponatisa: Paris: Imprimerie royale, 1733/34; 1754.
- Marković, Željko. 1968-1969. *Ruđe Bošković*. Zagreb: JAZU.
- Needham, Joseph, Wang Ling. 1959. *Science and Civilization in China*. Vol. 3. Mathematics, Astronomy, Geography, Cartography, Geology, Seismology and Mineralogy. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pouillet, M. 1953. *Éléments de physique expérimentale et de météorologie*. Paris: Hachette.
- Pray, Georgius. *Imposturae CCXVIII in dissertatione r. p. Benedicti Cetto, Clerici Regularis e Scholis Piis de Sinensium imposturis detectae et convulsae. Accedunt Epistolae anecdotae r. p. Avgustini e comitibus Hallerstein ex China scriptae*. Budae: Typis Regiae Universitatis.
- Tirnberger, Karl. 1770. Auszug aus den Wetterungsbeobachtungen, welche in der Sternwarte zu Grätz von 1765-1769 gemacht werden sind. Grätz: Widmanstätter.

⁶³Needham, Ling, 1959, 3: 451; Aimé-Martin, 1843, 4: 223-224; Benoît, pismo 4. 11. 1773).

TURJAŠKI KNEZ, PRVI KRANJSKI VAKUUMIST (ob 350-letnici Guerickejevega poskusa z magdeburškima polkroglama)

Stanislav Južnič

University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, ZDA

POVZETEK

Opisali smo sodelovanje med našim turjaškim knezom in magdeburškim županom Guericom. Dokazali smo, da je vrli Kranjec vplival na Guerickejevo eksperimentiranje. Guerickeju so se knezove pripombe k vakuumskim poskusom zdele dovolj tehtne, da jih je podrobno opisal v svoji knjigi. Prvi smo preučili ta nadvse pomemben odlomek iz Guerickejevega dela. Raziskali smo strokovno usposobljenost kranjskega kneza in njegove argumente v razpravah z Guerickejem. Posebej smo si ogledali zadnjih osem let knezovega življenja, ko je stanoval v Ljubljani in na Dolenjskem, svoje bogato znanje pa je prenašal na svoje kranjske družabnike. Pokazali smo, da so bile knezove polemike z Guerickejem temelj poznejšega razvoja vakuumske tehnike na Kranjskem.

Prince of Auersperg, the First Carniolan Vacuumist (On 350th Anniversary of Guericke's Experiment With Magdeburg Hemispheres)

ABSTRACT

Guericke's quarrels with the Carniolan prince of Auersperg in Regensburg were described. The fundamental contributions of the Carniolan prince to the success of Guericke's demonstrations was claimed. For the first time in historiography we carefully researched very important paragraph of Guericke's book dealing with prince Auersperg's contributions. The schooling and scientific competence of Carniolan prince was described. His ability as Guericke's critic was proved. The special concern was put on the last eight years of Auersperg's life in Ljubljana and Lower Carniola. His relations with other Carniolan nobles and commons were brought into light and connected with the later writing and experimenting with vacuum in Ljubljana.

1 UVOD

Leta 2004 bodo minila tri stoletja in pol od slovitega Guerickejevega poskusa v bavarskem Regensburgu. Iskri konji so ob bregovih Donave vlekli vsak sebi dve polkrogli izpraznjene posode: brez uspeha, a z velikim haskom. Le desetletje poprej sta Torricelli in Viviani sestavila barometer; toda florentinski akademiki izuma niso razobesili na veliki zvon v strahu pred morebitno ponovitvijo Galileijeve obsodbe iz leta 1633. Tako je preteklo kar nekaj vode, preden so naši idrijski rudarji začeli prodajati živo srebro za barometre. Šele v Regensburgu so prvič začeli glasno javno razpravljati o poskusih v vakuumu. Veljavnost znanstvenih domnev in eksperimen-

mentov so presojali tedanji izobraženi plemiči, ki so se navadili reševanja tehničnih problemov ob sukanju mečev med tridesetletno vojno.

Mestece Regensburg je bilo tedaj in še poldrugo stoletje pozneje del našega skupnega cesarstva. Ker smo bili Kranjci vedno pravi ljudje na pravih mestih, ne smemo biti presenečeni, da smo pomembno posegli v same začetke vakuumske tehnike.

Državni zbori so bili srečanja srednjeevropske smetane, ki niso mogla miniti brez radoživega kranjskega plemstva. Kočevski graščak, baron Ungnad,¹ je bil svetovalec cesarja Ferdinanda I.² na državnem zboru v Regensburgu leta 1546. Pozneje je postal najpomembnejši podpornik Primoža Trubarja, ki so mu pomagali tudi Turjačani. Deželni glavar Janez Cobenzl iz Predjamskega gradu pri Postojni se je leta 1594 pridružil tisoč osemsto spremljevalcem cesarja Rudolfa II.,³ vnuka Ferdinanda I., na državnem zboru v Regensburgu. Žal je tam umrl in domovine ni videl nikoli več. Bil je vnuk slovitega kranjskega Robina Hooda, Erazma Predjamskega († 1484), in oče matematika Janeza Rafaela Cobenzla.⁴ Janez Rafael se je moderne znanosti naučil pri Grienbergerju, Claviusovem nasledniku na kolegiju v Rimu. Leta 1626 in 1627 je kot svetovalec avstrijskega provinciala in rektor na Dunaju pomembno vplival na šolanje junaka naše zgodbe, Janeza Vajkarda Turjaškega.

Seveda so se tudi leta 1653 in 1654 kranjski plemiči udeležili zborovanja v Regensburgu. Najpomembnejši med njimi je bil grof Janez Vajkard Turjaški.⁵ Bil je pravnuk slovitega vojskovodje, barona Herberta Turjaškega,⁶ ki je pogumno padel pod turško sabljo, in vnuk njegovega najstarejšega sina Krištofa.⁷ Janez Vajkard je bil četrti od petih sinov dednega maršala Ditriha Turjaškega,⁸ ki je žužemberški grad podedoval konec prejšnjega stoletja po požaru, ki je grad uničil po veliki noči leta 1591. Ditrih je leta 1631 kupil še bližnje gospostvo Vrhkrka (Obergurk), ki ga je po njegovi smrti tri leta pozneje podedoval sin Janez Vajkard. Leta 1625 se je Ditrih med zadnjimi vrnil v katoliško vero in istega leta kupil dve hiši na vogalu Gosposke in Turjaške ulice, ki ju je prezidal leta 1631 in 1632. 16. 9. 1630 je postal

¹ Ivan Ungnad (* 18. 8. 1493 grad Ženek na Koroškem; † 27. 12. 1564 Vintišov na Češkem)

² Ferdinand I. (* 1503; † 25. 7. 1564 Dunaj; cesar 1556)

³ Rudolf II. (* 1552; † 1612; cesar 1576)

⁴ Joannes Raphael Kobenzl (* 1571 Jama; SJ 1587; † 17. 2. 1627 Dunaj)

⁵ Janez Vajkard Auersperg (Johann Weikhard, * 11. 3. 1615 grad Žužemberk; † 13. 11. 1677 Ljubljana)

⁶ Herbert VIII. Turjaški (* 15. 6. 1528 Dunaj; † 22. 9. 1575 Budačko)

⁷ Christoph II. (* 27. 10. 1550; † 14. 5. 1592 Lublin na Poljskem)

⁸ Dietrich Auersperg (Teodorik, * 2. 6. 1578; † 25. 8. 1634 Ljubljana)

državni grof, naslov pa so podedovali njegovi sinovi. Tako je naš junak Janez Vajkard preživel mladost in prva šolska leta v isti ulici nasproti deželne hiše, kjer sta živela tudi druga dva kranjska kneza in ministra, Eggenberg⁹ in Portia.¹⁰ Portia je bil poročen s sestrično Janeza Vajkarda.¹¹

Ditrihovi najstarejši sin, grof Volk Engelbert Turjaški,¹² je 9. 7. 1641 kupil gospostvi Kočevje in Poljane. Leta 1649 je postal deželni glavar, naslednje leto pa si je dal sezidati grad ob robu tedanjega mesta Kočevje. Leta 1642 je nadaljeval očetovo gradnjo v Ljubljani,¹³ 20. 4. 1660 pa je ob očetovi severni polovici "knežjega dvorca" začel zidati še južni del na prostoru današnjega Plečnikovega NUK-a v Ljubljani. Gradnjo je zaključil v dveh letih. Blizu knežjega dvorca je bratranec Volka Engelberta, grof Janez Andrej Turjaški¹⁴ s Turjaka, med letoma 1654 in 1659 združil tri stavbe v turjaško grofovsko palačo na Gosposki in Križevniški ulici. Danes je tam Mestni muzej na Gosposki ulici št. 15.¹⁵ Tako so postali knezi Turjačani iz Kočevja in grofje Turjačani s Turjaka sosedje v svojih veličastnih stavbah sredi Novega trga, ki je postajal deželni upravni plemiški del Ljubljane.

Volk Engelbert je v svojem dvorcu prirejal gledališke in operne predstave. Ob začetku gradnje severnega dela dvorca je dal leta 1660 uprizoriti opero po beneškem zgledu. V dvorcu je dopolnjeval tedaj najbogatejšo plemiško knjižnico v deželi, ki so jo njegovi predniki začeli zbirati na turjaškem gradu v 14. stoletju.

Medtem ko se je Volk Engelbert uveljavljal v najvišjih ljubljanskih krogih, je njegov mlajši brat Janez Vajkard vodil politiko cesarja Ferdinanda III.¹⁶ Cesarja so vzgajali jezuiti in je postal sposoben jezikoslovec in skladatelj cerkvene glasbe. Ko je Janez Vajkard končal študije na plemiškem kolegiju, mu je cesar zaupal vzgojo svojega najstarejšega sina in prestolonaslednika.¹⁷ Leta 1637 je Janez Vajkard postal dvorjan. Dve leti pozneje se mu je na dunajskem dvoru cesarice Marije Ane Španske pridružil starejši brat Herbert Turjaški,¹⁸ ki se je leta 1649 poročil z baronico Moscon s Krškega.

17. 9. 1653 je cesar povišal Janeza Vajkarda v državnega kneza. Svečanost so uprizorili na državnem zboru v Regensburgu, tri mesece po kronanju cesarjevega najstarejšega sina. Janez Vajkard je dobil v fevd grofijo Wels v Zgornji Avstriji. Naslednje leto je cesar dal Janezu Vajkardu še šlezjski kneževini Münsterberg (Ziebice) in Frankenstein (Zabkowitz Slaske) v danes poljskih Sudetih, sto kilometrov južno od Breslaua (Wrocław, Vratislava).¹⁹ Takrat je Janez Vajkard postal tajni svetnik, vitez zlatega runa, konferenčni in državni minister. Njegov tekmeč Lobkowitz²⁰ je istočasno dobil naslov tajnega svetnika, tako da so, skupaj s Portio, krojili cesarsko zunanjo politiko.

Poklicne uspehe je Janez Vajkard kronal še z osebniimi. 20. 11. 1654 je praznoval prisrčno poroko z grofico Losenstein.²¹ Njen oče, grof Jurij Ahac²² z gradu Losensteiner pri Steyru v Gornji Avstriji, je bil prav tako dvorjan Ferdinanda III. Umril je med zborovanjem v Regensburgu, dva meseca po pokneženju bodočega zeta. Malo za Losensteinom je pobralo še njegovo ženo.²³ Njuno sirotno hči je naš vrli knez hitro potolažil, saj mu je rodila osem otrok.

2 VAKUUM V REGENSBURGU

Poreklo Otta Guerickeja²⁴ je bilo za spoznanje nižje. Rodil se je v družini uradnikov in patricijev, ki so živeli v Magdeburgu od leta 1315. Med njegovimi predniki je bilo kar trinajst županov. Študiral je filozofijo in pravo na univerzah v Leipzigu, Helmstädtu in Jeni. Šolanje je dopolnil na inženirski šoli v Leydenu, nato pa si je razširil obzorja s popotovanjem po Angliji in Franciji. Po vrnitvi v rodni Magdeburg se je med tridesetletno vojno leta 1626 začel ukvarjati s politiko in dvajset let pozneje postal eden od petih županov v Magdeburgu. Vmes je preživljal hude ure, še posebno potem, ko je maršal Tilly²⁵ leta 1630 prevzel poveljstvo cesarske armade. 20. 5. 1632 se je Guernickeju posrečilo pobegniti iz gorečega Magdeburga le zato, ker je imel njegov tast stike s Tillyjevimi oficirji, ki so dali pobiti dve tretjine

⁹ Johann Ulrich Eggenberg (* junij 1568 Gradec; † 18. 10. 1634 Ljubljana; knez 1623; vojvoda Krumau na Češkem 1628 (Valvasor, 1977, 269))

¹⁰ Johann Ferdinand Porcia (* 1606; † 1665)

¹¹ Anne Konkordia Elisabeth Auersperg (* 1610; † 1636)

¹² Volk Engelbert Turjaški (Volfgang, Wolf, * 22. 10. 1610; † 28. 4. 1673)

¹³ SBL, 1: 19

¹⁴ Janez Andrej Auersperg (* 16. 7. 1615; † 8. 10. 1664)

¹⁵ Lubej, 2002, 36

¹⁶ Ferdinand III. (* 13. 7. 1608 Gradec; † 2. 4. 1657 Dunaj; cesar 15. 2. 1637)

¹⁷ Ferdinand IV (* 8. 9. 1633 Dunaj; † 9. 7. 1654 Dunaj; izvoljen za nemškega kralja 31. 5. 1653, kronan 18. 6. 1653 v Regensburgu)

¹⁸ Herward Auersperg (* 1613; † 1678)

¹⁹ Granda, 1980, 200

²⁰ Wenzel Franc Lobkowitz (20. 1. 1609 Praga; † 22. 4. 1677 Ravnitz; vojvoda Sagino leta 1646, generalfeldmaršal leta 1647)

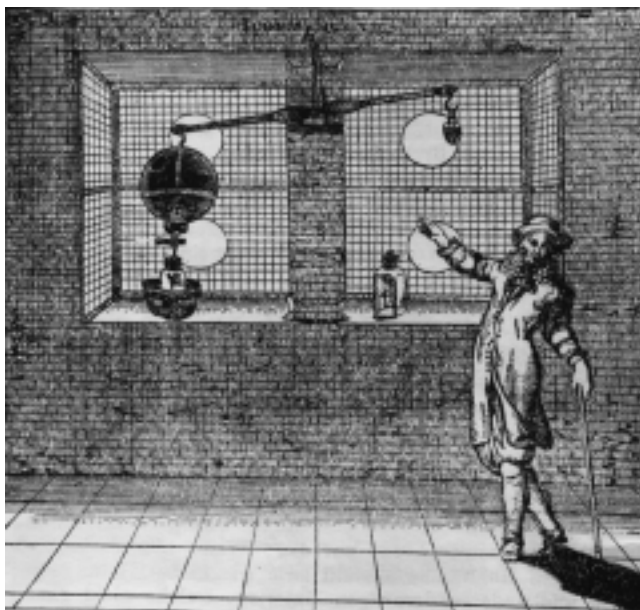
²¹ Marija Katarina grofica Losenstein (* 1635; † 1691)

²² Georg Achaz grof Losenstein (* 1597; † 25. 11. 1653 Regensburg)

²³ Marija Franciska pl. Mansfeld († 8. 9. 1654 Dunaj)

²⁴ Otto Guericke (* 30. 11. 1602 Magdeburg; † 21. 5. 1686 Hamburg)

²⁵ Grof Johann Tserclaes Tilly (* februar 1559 Tilly v Brabantu; † 30. 4. 1632 Ingolstadt)



Slika 1: Poskus, ki ga je Guericke kazal Turjaškemu knezu leta 1654 v Regensburgu (Guericke, 1986, 76)

od trideset tisoč Guericikovih someščanov. Bosanska Srebrenica tako nikakor ni nov izum.

Protestant Guericke je v vojni vihuri služil kot inženir v švedski in nato v saški armadi.²⁶ Kljub razumljivi zameri do Tillyja je po vojni sodeloval s svojim cesarjem Ferdinandom III., ki je osebno prevzel poveljstvo armade štiri leta po Tillyju. Guericke je zastopal koristi svojega mesta na konferenci v Osnabrücku, kjer so se med letoma 1645 in 1648 končno dogovorili o miru po tridesetletni vojni. Tam je prvič srečal Janeza Vajkarda Turjaškega, ki se je na konferenci mudil v cesarjevem spremstvu. Ponovno sta se srečala med Guerickejevim obiskom na dunajskem dvoru.²⁷ Zgovorni Guericke je že tedaj rad poročal o svojih vakuumskih poskusih.

Župan Guericke se je državnega zbora v Regensburgu udeležil kot politik, poln znanstvenega častihlepja. Cesarju in knezom je kazal poskuse s tlakom zraka in pripovedoval o novih, komaj odkritih pojavih. Nejevernim plemičem je zagotavljal, da ozračje nad nami pritiska na vsa votla telesa, ki niso povsem zapolnjena z lesom, kamnom in podobnimi snovmi. Zrak zapolni vse praznine; če pa do njih ne more, pritiska na prazne posode, da jih preoblikuje.

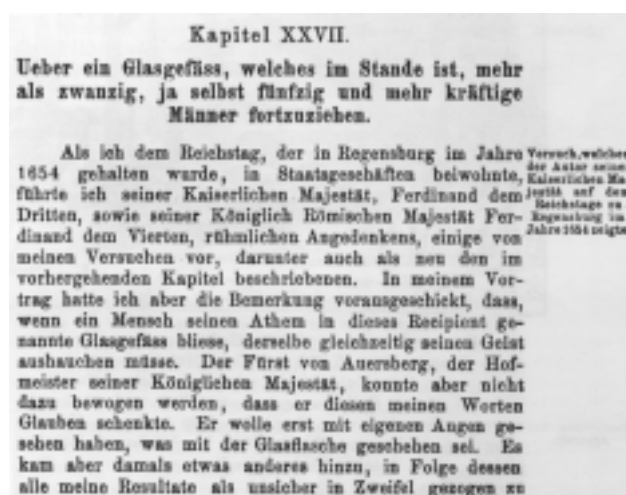
Domiselni župan je prvi tehtal zrak, kar bi se marsikomu še danes zdelo za malo. Uravnovesil je tehtnico tako, da je na eno stran obesil vakuumsko posodo, na drugo stran pa uteži. Nato je posodo izpraznil in ugotovil, da mora za ravnovesje na nasprotni strani odstraniti nekaj uteži.

V drugem poskusu je štirikotno posodo izčrpal in zatesnil z ventilom. Posoda ni zdržala zunanjšega tlaka

in je razpadla v tisoč in več kosov z ostrim pokom. Okrogla posoda ni počila, saj se ni tako zlahka podala zunanjemu tlaku.

Guericke je cesarju Ferdinandu III., kralju Ferdinandu IV., Turjačanu in drugim knezom kazal poskuse v praznem prostoru in mimogrede omenil, da nam zmanjka zraka, ko pihnemo v vakuumsko posodo. Vedel je, da nas lahko doleti marsikaj hudega, če pihnemo v vakuumsko posodo. Zunanji tlak ne iztisne le vsega zraka iz človeškega ali živalskega telesa v vakuumsko posodo, temveč poškoduje tudi samo telo s črevesjem vred. Zaradi pritiska se telo močno poškoduje in lahko umremo. Turjaški knez mu nikakor ni verjel na besedo. Ni bil pripravljen opustiti Aristotelovega nauka iz svojih študentskih klopi, kjer se je vakuum zdel skregan z zdravo pametjo. Za nameček tudi nedavno umrli Descartes²⁸ ni priznaval praznega. Naš vrli Turjačan se je hotel na lastne oči prepričati, kaj se dogaja v stekleni vakuumski posodi.

Turjaški knez je prav tedaj napolnil devetintrideset let in je bil v marsičem mogočnejši od samega prezgodaj ostarelega cesarja. Dvom mogočnega kneza je postavil pod vprašaj še vse druge Guerickejeve poskuse. Bilo je vprašanje osebnega prestiža: ali bo Guericke prepričal kneza v tehtnost svojih premislekov? Guericke ni bil posebno doma v Aristotelovi logiki in se ni rad spuščal v razprave o naravi vakuuma, ki jih je pogosto premleval njegov tekmeč Boyle onstran Rokavskega preliva. Guericke je v praznem prostoru videl predvsem uporaben izum, ki bo morda lahko pomagal poganjati stroje. Domnevo je dokazal šele francoski protestant Papin,²⁹ ki je dve leti po Guerickejevi smrti prevzel katedro za matematiko na univerzi v Marburgu, dvesto petdeset kilometrov jugozahodno od Guerickejevega Magdeburga.



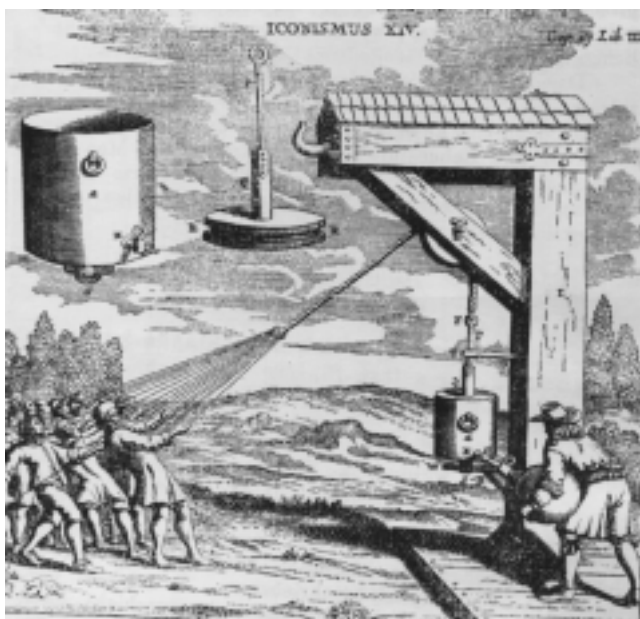
Slika 2: Guerickejevo poročilo osemnajst let po sporu s Turjačanom (Guericke, 1986, 77)

²⁶ Hellyer, 1998, 279

²⁷ Guericke, 1986, 108

²⁸ René Descartes (* 1596; † 1650)

²⁹ Denis Papin (* 1647; † 1712)



Slika 3: Takole je Guericke prepričeval Turjaškega kneza, da vakuum res obstaja (Guericke, 1986, 78)

Guericke se je izognil sholastičnemu prepiru s Turjačanom in prepustil odločitev poskusom.³⁰ Da bi odstranil dvom s svojih eksperimentov, je najel dvajset, trideset in končno sto ljudi, ki niso mogli vzdigniti pokrova z izpraznjene vakuumske posode.³¹ Izračunal je, da na pokrov pritiska zračni tlak 13 kN, ki ga trideset ali celo petdeset mož ne more premagati. Očitno ni imel opravka s posebnimi silaki. Ljudi je nato nadomestil z utežmi in tako stehal zračni tlak.³² Kranjskemu knezu in drugim presenečenim velikašem je pokazal, kako vakuum "vleče" vodo navzgor po cevi, ugasne svečo in zaduši tiktakanje ure. Ljubiteljem grozdja in njegovih predelanih oblik, ki jih tedaj ni manjkalo in jih ne manjka niti danes, je postregel z nadvse razveseljivo novico. Odkril je, da lahko grozdje v vakuumu ohrani sveže pol leta: "Končno naj bo na tem mestu omenjeno: ko grozdje postavimo v takšno stekleno posodo, jo izpraznimo in nato shranimo v mrzlem kraju za pol leta, se grozdje glede videza ne bo spremenilo, vendar bo izgubilo ves sok." Uspešnost vakuumskega konzerviranja je pojasnil: "Od tod sledi, da sok v praznem prostoru izpuhti, medtem ko bi se sicer zaradi tlaka okoliškega zraka vračal nazaj in ostajal v notranjosti."³³

Vse to vrlemu Turjačanu ni bilo dovolj. Kot pristni vitez svojega časa si je želel zaplet s praznim prostorom razrešiti, kot se spodobi za vnuka vojskovodij iz turških vojsk. Vajeni viteških turnirjev so knezi najbolj zaupali svojim iskrim vrancem, zato so prav njim



Slika 4: Poskus z magdeburškima polkroglima, ki si ga je Turjačan ogledal leta 1654 v Regensburgu (Guericke, 1986, 68/69; Schott, 1664, 38)

naložili razrešitev vakuumske uganke. Zborovanje v Regensburgu je bilo dolgo, zato je bila vsaka zabava dobrodošla. Sloviti magdeburški polkrogli sta bili vrh večmesečnih razprav in poskusov z vakuumom v Regensburgu. Pričakovanje je bilo velikansko, ni manjkalo niti stav za to ali nasprotno stran. Sam cesar, Turjačan in drugi volilni knezi so podaljšali svoje bivanje v mestu, da bi si ogledali, kako se bodo odločili Guerickejevi konji.³⁴ Priprave za prvo veliko razkošno vakuumsko prireditev v zgodovini so se zavlekle, saj je Guericke vse pogoje glede površine in premera krogel ter števila vpreženih konj najprej natančno preračunal.³⁵ Hotel je biti povsem gotov, da mu Turjačan ne bi mogel spet česa očitati. Rezultati računov so ga prepričali, da se, bog ne daj, konjem nikakor ne bo posrečilo razstaviti polkrogli, ko bo iz prostora med njima izčrpal zrak. Za vsak primer je v računih konjem pripisal skoraj dvakrat previsoke moči.³⁶ Turjačan se je po svoji strani seveda prav tako dobro pripravil, da bi Guericke morda gledalcem ne podtaknil kakšnih nemočnih kljuset.

Nato so konji vlekli, vlekli... Končno so klobuki številnih radovednežev, knezov in z rahlo zamudo še samega Turjačana zleteli v zrak. Magdeburški župan je zmagal. Še zadnji dvomljivec je moral priznati, da je priča novemu poglavju fizike. Seveda so se številna kopja še pol stoletja lomila nad razlagami vakuumskih pojavov s praznim prostorom, zračnim tlakom, nevidnimi nitkami ali parami. Vakuum je vstopil v srednjeevropsko visoko družbo na posebno veličasten način, pod kritičnim očesom našega turjaškega kneza.

³⁰ Hellyer, 1998, 280-282

³¹ Guericke, 1986, 77.

³² Borisov, 2002, 665; Guericke, 1986, 80

³³ Guericke, 1986, 49-50

³⁴ Hellyer, 1998, 266

³⁵ Guericke, 1986, 66-69, 71-73

³⁶ Guericke, 1986, 66-112

3. TURJAŠKI KNEZ V POLITIČNEM VAKUUMU

Novica o magdeburških polkroglah je hitro obšla Evropo. 22. 7. 1656 je Guericke poročal Schottu o poskusu z bakrenima polkroglama v Regensburgu.³⁷ Knez je nagovoril cesarja, da je Guerickeja povabil na Dunaj. Znameniti poskus s konji, ki zamaš vlačijo narazen dve polovici vakuumske posode, je Guericke ponovil na cesarskem dunajskem dvoru leta 1657, kmalu po smrti cesarja Ferdinanda III. Lične lipicance so spodbujale najlepše dame cesarstva, toda polkrogel kljub temu niso razdvojili.

Naš knez je bil tedaj že dolgo najmočnejši v cesarskem mestu. Njegov varovanec, kralj Ferdinand IV., se je sicer kmalu po svojem kronanju nalezil črnih koz in umrl. Prestol je prevzel mlajši brat Leopold I.,³⁸ ki so ga jezuiti dotlej vzgajali za cerkvene službe. Bil je še mlad, zato je dunajsko politiko slej ko prej vodil njegov svetovalec in prvi minister, knez Janez Vajkard. Cesar in knez sta se pod Guerickejevim vplivom začela zanimati za vakuumsko tehniko, zato sta leta 1658 obiskala Schotta in jezuitski kolegij v Würzburgu.³⁹

6. 9. 1660 je knez z ženo preko Ljubelja prispel v bratov ljubljanski dvorec. Tam so pripravili sprejem za cesarja, ki je naslednji dan prišel v belo Ljubljano na dedno poklonitev.⁴⁰ Med 18. in 24. 9. 1660 so opravili dedno poklonitev v Gorici, kjer je slavnostno govoril Baučer,⁴¹ prvi zgodovinar slovenskega rodu.

Leta 1663 je Turjaški knez kupil grofijo Thengen na Tirolskem,⁴² ki je z njegovim nakupom postala poknežena. Za sprostitev je najraje lovil v kranjskih gozdovih. Zato si je 18. 6. 1665 od kneza Portia kupil tedaj še kranjsko gospostvo Pazin v Istri. Naslednje leto mu je priključil sosednji gospostvi Paz in Krašan, skupaj z bratom Volkom Engelbertom pa sta kupila vsak po pol graščine Belaj pri Pazu, 15 km vzhodno od Pazina.

Medtem so dnevi sloge med premogočnim knezom in vedno bolj samostojnim novim cesarjem hitro minevali. Naš Turjačan si je želel kardinalskega klobuka, ki je pozneje res samo enkrat okrasil kranjsko glavo. Cesarja sploh ni obvestil o pogajanjih s papežem. Obenem je skušal spremeniti zunanjo politiko Habsburžanov, ki so se med tridesetletno vojno in po njej lasali s Francozi. To ni bilo mogoče v času Italijana Mazarina,⁴³ ki je dobil kardinalski klobuk leta 1641, stolček prvega ministra v Parizu pa



Slika 5: Turjaški knez Janez Vajkard

leta 1643. Mazarin je skrbel za francosko prevlado v Evropi. Celo leto po smrti Ferdinanda III. je oviral izvolitev Leopolda I. za cesarja, dokler ni Lobkowitz prepričal Schönborna, da je glasoval za Habsburžana.

Po Mazarinovi smrti in dobrohotnem mirovnem sporazumu s Turki v Vasvarju, podpisanem 10. 8. 1664, se je Turjačanu zdelo, da je prišel čas za preobrat. Mazarinov naslednik, ljubitelj knjig Colbert,⁴⁴ ki je leta 1665 postal glavni kontrolor francoskih financ in leta 1669 minister za mornarico, se je zdel dober sogovornik. Cesar Leopold I. je bil v tesnem sorodstvu in prijateljstvu s francoskim kraljem. Kljub nepričakovani okupaciji Belgije 26. 5. 1667 je nekaj mesecev pozneje, 19. 1. 1668, sklenil tajni sporazum z Ludvikom XIV.⁴⁵ za morebitno delitev španske dediščine. Francoski veleposlanik na Dunaju med letoma 1664 in 1673, generalpodpolkovnik Grémonville,⁴⁶ je povsem obvladoval dunajsko diplomacijo Lobkowitza in Turjačana.

Po smrti Turjačanovega sorodnika Portie je Lobkowitz prevzel položaj prvega svetovalca na dvoru. Knezova skrivna pogajanja s francoskimi diplomati in s papežem so prišla na uho cesarju, ki je komaj čakal, da je lahko nekdanjemu očetovemu varovancu pristrigel peruti. Na zahtevo španskega dvora je Turjačana najprej leta 1669 predčasno upokojil. Istega

³⁷ Schott, 1657, 460; Schott, 1664, 18, 39

³⁸ Leopold I. (* 6. 6. 1640; † 5. 5. 1705; cesar 18. 6. 1658)

³⁹ Hellyer, 1998, 100

⁴⁰ Valvasor, 1977, 214

⁴¹ Martin Baučer (* 1594 Sela na Vipavskem; SJ; † 1668)

⁴² Granda, 1980, 200

⁴³ Giulio Mazarini (* 1602; † 1661)

⁴⁴ Jean-Baptiste Colbert markiz Seignelak (* 19. 8. 1619 Riems; † 6. 9. 1683 Pariz)

⁴⁵ Ludvik XIV (* 1636; † 1715; kralj od 1743)

⁴⁶ Jacques Bretel de Grémonville (* 1694 Bretagna; † 1680)

leta ga je dal obsoditi na smrt zaradi izdaje. Seveda ga je nato oprostil in ga "le" pregnal s cesarskega dvora. Novi prvi minister in direktor kabineta je postal Lobkowitz.

Po Turjačanovi odstavitvi je Leopold I. izigral francoskega kandidata za naslednika poljskega kralja Jana Kazimierza.⁴⁷ Poljsko šlaho je prepričal, da je 19. 9. 1669 izvolila habsburškega kandidata Wisniewieckiego,⁴⁸ ki se je naslednje leto poročil z Leopoldovo polsestro, Eleonoro Marijo.⁴⁹ Grémonville in jezni francoski poslanci so iskali zaveznike med ogrskimi zarotniki, vendar so njihovi načrti prišli na uho Lobkowitzu. Zarotniška kneza, Frankopan⁵⁰ in Zrinjski,⁵¹ sta se prostovoljno predala dunajskim ječarjem aprila 1770, le nekaj mesecev po Turjačanovem padcu. Hrvata nista imela Turjačanove sreče in so ju po celoletnem zaslišanju obglavili. Med načrti Zrinjsko-Frankopanske zarote je bil prodor osemstotih zarotnikov pod vodstvom brodskega župnika Juraja Prpinića čez Kostel na Kranjsko do Kočevja,⁵² kjer so upali na podporo Turjačanov.

Agresivna Colbertova trgovinska politika do Nizozemske je prisila Leopolda I. k protiukrepom. Francozi in Habsburžani so leta 1671 še sklenili pogodbo o nevtralnosti. Naslednje leto pa je izbruhnila nizozemska vojna, prva izmed treh vojn med Ludvikom XIV. in Leopoldom I.

Lobkowitz je Turjačanov položaj obdržal do leta 1674, umrl pa je le nekaj mesecev pred Turjačanom. Pod Lobkowitzovo diplomacijo je prišlo do kratkotrajnega političnega zasuka in katoliške zveze s Parizom in Madridom; vendar je nepredvidni Turjačan odletel kot petelin, ki je kikirikal prezgodaj.

4 GUERICKEJEVA ČRPALKA V LJUBLJANI?

Turjaški knez je imel dovolj pod palcem; morda je nabavil Guerickejevo črpalko, ki je bila največji in najdražji znanstveni instrument tedanjega časa? Od leta 1647 do knezove preselitve na Kranjsko leta 1670 Guericke in drugi niso sestavili več kot petnajst vakuumskih črpalk.⁵³ Guericke je prve poskuse z vakuumom opravil že leta 1640, osem let pozneje pa je dal sestaviti prvo različico "magdeburških polkrogel".⁵⁴ Med tem je preučil Descartesove Principe filozofije iz leta 1644 in sklenil, da bo sporen obstoj vakuuma dokazal s poskusi. Tako je Descartes s svojimi napakami spodbudil nasprotnike, naprej Guerickeja, pozneje pa Newtona.⁵⁵

Guericke je izdelal prvo črpalko v Magdeburgu leta 1648. Dve leti pozneje je sestavil črpalko, s katero je leta 1654 izpraznil polkrogli za znameniti poskus v Regensburgu. Po uspešnem poskusu so se mnogi knezi zanimali za nakup črpalke. Guericke je napravo prodal Schönbornu,⁵⁶ ki je ponudil največ. Kupec je bil knezoškof v Würzburgu in Wormsu ter nadškof in volilni knez v Mainzu, zato mu denarja seveda ni manjkalo. Naprave ni kupil zase, temveč jo je dal jezuitski univerzi v Würzburgu. Že 22. 6. 1655 je Schott s poti skozi Mainz pisal Kircherju o Guerickejevi napravi, še preden jo je leta 1655/56 prevzel skupaj s katedro za matematiko na univerzi v Würzburgu. Schott je bil Kircherjev prijatelj in učenec, zato je zelo hitro ugotovil, kakšen zaklad mu je padel v roke. Začel si je dopisovati z Guerickejem in objavljati njegove dosežke. Čeprav je bil Schott deset let profesor v Würzburgu nedaleč od Guerickejevega Magdeburga, nimamo pričevanj o njunem morebitnem srečanju. Guerickejev sin pa je vljudno obiskal Schottovega učitelja Kircherja v Rimu.⁵⁷

Pri prvi črpalki je Guericke napolnil sod za vino ali pivo z vodo, ga dobro zatesnil in nato vodo iztočil skozi nizko pritrdjeno bakreno cev. Sod se je s treskom sesul vase, še preden je voda do konca odtekla. Pozneje je leseni sod nadomestil z bronastim, tako da je bila črpalka v resnici obrnjena ročna gasilna brizgalna. Brizgalne so poznali že v antiki, v novejšem času pa jih je leta 1546 podrobno opisal Georgius Agricola⁵⁸ v znameniti knjigi o kovinah, ki jo je bilo leta 1678 mogoče kupiti tudi v Ljubljani.

Okoli leta 1650 je Guericke sestavil zračno črpalko, s katero je štiri leta pozneje v Regensburgu izpeljal sloviti poskus z magdeburškima polkroglama. Ni uporabil premičnih stikov v obliki stožcev in tulcev. Polkrogli iz bron s premerom 0,68 m⁵⁹ je zatesnil s prstanom iz kože, pomočenim v mešanico voska in terpentina, čeprav je včasih tesnil tudi s smolo. Način črpanja je leta 1672 označil kot "hiter". Zapis je seveda relativen; navadno je najel dva močna moža, ki sta črpala dve ali tri ure. Uporabljal je pet različno velikih vakuumskih posod, največja je bila več kot desetkrat večja od najmanjše.⁶⁰

Leta 1657 je Schott objavil prve skice Guerickejevih črpalk. V knjigi je najprej nameraval opisati hidravlične in pnevmatske naprave iz Kircherjevega rimskega muzeja, pozneje pa je vključil še druge poskuse.⁶¹ Knjigo je posvetil Schönbornu,⁶² ki je seveda izdatno odprl svojo možnjo in se je tako znova

⁴⁷ Jan II. Kazimierz Vasa (Jean-Casimir, * 1609; † 1672; kraljeval 1648-1668)

⁴⁸ Mykolas Kaributas Visniaveckis (Michael Korybut Wisniowiecki, * 1649; † 1673; kraljeval 1669-1673)

⁴⁹ Eleonora Marija Jožefa (* 1653; † 1697)

⁵⁰ Franjo Krsto Frankopan (* 1643; † 30. 4. 1671 Dunajsko novo mesto (Wiener-Neustadt))

⁵¹ Petar Zrinjski (* 1621 Vrbovec; † 30. 4. 1671 Dunajsko novo mesto)

⁵² Lopašić, 1879, 202

⁵³ Hellyer, 1998, 295

⁵⁴ Sparnaay, 1992, 4; Madey, 1984, 11

⁵⁵ Hablanić, 1984, 18

⁵⁶ Johann Philipp von Schönborn (* 1605; † 1673 (Hellyer, 1998, 265; Guericke, 1986, 113))

izkazal za dobrotnika zgodnjih vakuumistov. Zato mu je Schott seveda posvetil tudi knjigo leta 1664, saj njegova profesorska plača niti približno ni zadostovala za tiskanje tako velikih in bogato ilustriranih del. Schott ni priznaval vakuuma, podobno kot njegov prijatelj in zaščitnik Nigro Ponte⁶³ iz znane praške zdravniške družine, ki je verjel v živosrebrne pare nad barometrom. Nigro Ponte je kritiziral alkimiste, zato je Kranjec Rain⁶⁴ v Ljubljani objavil knjigo proti njemu in jo posvetil cesarju Leopoldu I. Cesar pa ni pošiljal zlatnike le našemu Rainu, temveč je izdatno podpiral tudi njemu nasprotne knjige Nigro Ponta in njegovega vzornika Kircherja, ki sta prav tako knjige polnila z veličastnimi posvetili cesarju. Žal danes podobnih cesarjev, knezoškofov ali vsaj volilnih knezov ni na spregled.

Guericke je ponovil Périerove in Pascalove poskuse z gore Puy-de-Dôme ter postavil prvi barometer na vodo. Črpalka je bila nameščena v dveh nadstropjih njegove hiše. Cev z vodo je segala do tretjega nadstropja, v vodi pa je plavala figura iz lesa. Sosedje so se sprva muzali na račun otročarij svojega župana, ki je prostore v hiši polnil s čudnimi napravami. Lepega dne leta 1660 je Guericke opazil veliko znižanje zračnega tlaka dve uri pred strašno nevihto in je urno opozoril meščane.⁶⁵ Ženske so pravočasno zaprle vsa okna in se dobro pripravile na neurje. Točna vremenska napoved, ki jo le redko zmorejo sodobni meteorologi, mu je seveda prinesla velik ugled. Hvaležni Magdeburžani so ga vedno znova volili za župana.

Leta 1662, ko je že poznal Boylovo zgodnje delo, je Guericke sestavil tretjo različico črpalke brez pomanjkljivosti prvih dveh. Prvi dve Guerickejevi črpalki sta bili obrnjeni gasilski brizgalni. Imeli sta bronasta valja, lesena bata in bakreno kroglo, ki je bila v drugi inačici uporabljena za vakuumsko posodo. Pozneje je Guericke obrnjeno ročno gasilno brizgalno dopolnil z zaklopko na pokrovu. Uporabil je manjšo vakuumsko posodo. Iz nje je namesto vode neposredno črpal zrak, kar je bil eden najpomembnejših Guerickejevih prispevkov k vakuumski tehniki.

Guericke je leta 1662 za črpanje uporabljal sistem vzvodov. Hooke in Boyle sta poenostavila črpanje z uporabo železne natezalnice in peresa. Ni jima bila po volji velika količina vode, ki jo je Guericke potreboval za tesnitev. Uporabljala sta zapiralne pipe, namazane z mazivom za stroje in zaklopke, ki jih je bilo treba

ročno odpirati in zapirati. Lesen bat je dvigoval in spuščal bronasti valj. Da bi zagotovila dobro tesnitev, sta uporabljala med batom in valjem "debel kos strojenega usnja za podplate". Njuno mazilo za stroje je bilo bržkone mešanica olivnega olja in drugih zelenjavnih sokov, skuhanih skupaj z oksidom svinca. Dodala sta še malo kuhinjskega olja, s katerim sta omočila bat, in okroglo stekleno vakuumsko posodo.⁶⁶

Guerickejeve poskuse je Schott opisal skupaj z Boylovimi leta 1664 v Nürnbergu v Tehniških zanimivostih, ki so jih štirinajst let po natisu prodajali v Ljubljani. 14. 3. 1663 je Guericke končal sedem delov svoje knjige, ki jih je zaradi prezaposlenosti in občasni bolezni izdal šele desetletje pozneje. Čeprav je knez Turjaški v tem času že prišel v nemilost, je Guericke v končni izdaji objavil natančen opis njunih prerekanj glede vakuuma.

Guericke je svoje naprave imenoval "syringes", "antilia pneumatica" in leta 1662 "Reiseluftpumpe". Boyle je svoje črpalke krstil za "pneumatic machines". Naziva zračne in vakuumske črpalke sta se uveljavila pozneje. Schott in Guericke sta kritizirala uporabnost Hookove in Boyleve črpalke, Britanca pa sta očitke vračala. Del kritike je izviral iz slabe obveščeniosti, saj sta Hooke in Boyle poznala le prvo različico Guerickejeve črpalke iz Schottove knjige. Schott in Guericke sta menila, da je črpalka njunih britanskih kolegov slabo tesnjena. Kljub temu so si občasno drug od drugega izposojali ideje za posamezne dele črpalke, ne da bi se menili za avtorske pravice.

Leta 1666 je cesar Leopold I. povzdignil Guerickeja v plemiški stan, tako da se je odtlej podpisoval s pridevkom "von". Vsemogočni knez Turjaški je pripomogel k napredovanju svojega prijatelja, čeprav pri novem cesarju ni bil tako v čislju, kot svoj čas pri njegovem očetu in bratu.

Guericke je samo za svoje eksperimentalne naprave zapravil 20.000 talerjev. Toliko jih je naštel sin, pri katerem je v Hamburgu preživel zadnjih pet let, potem ko se je leta 1681 naveličal županskih časti. Tudi s knjigo si ni preveč opomogel, saj mu amsterdamski izdajatelj leta 1672 ni izplačal honorarja, temveč mu je z muko dostavil le nekaj avtorskih izvodov.⁶⁷

Trije originalni Guerickejevi izdelki so ohranjeni še danes: v Tehniškem muzeju Malmö, v Nemškem muzeju München in na Tehniški visoki šoli v Braunschweigu.⁶⁸ Naš Turjaški knez bi lahko znamenito

⁵⁷ Hellyer, 1998, 280

⁵⁸ Georg Bauer (* 1494; † 1555)

⁵⁹ 3/4 jarda

⁶⁰ Schott, 1657, 445

⁶¹ Grant, 1981, 395

⁶² Hellyer, 1998, 268

⁶³ Jakob Joannes Wenčeslav Dobrzensky iz Černeho Mostu (Wenceslaus Schwartzbrug, Nigro Ponte, * 1623; † 1697 (Schott, 1664, 252, 885))

⁶⁴ Janez Friderik pl. Rain (Joannes Frideric, * 1613 Strmol; † po 1686)

⁶⁵ Sparnaay, 1992, 39; Schott, 1664, 66-67

⁶⁶ Sparnaay, 1992, 26-27

⁶⁷ Guericke, 1986, 109; Shapin, 1993, 277-278

črpalko ali vsaj kakšne manjše vakuumske priprave pripeljal v svoj ljubljanski dvorec. Gotovo ni kupil prve črpalke iz leta 1648 ali one iz leta 1650, ki jo je uporabljal Schott, lahko pa si je preskrbel črpalko iz leta 1662. Več črpalke je bilo na razpolago kupcem šele po propadu Turjačanove politike na Dunaju. Po Senguerdovih⁶⁹ načrtih jih je začel izdelovati Samuel van Musschenbroek (1639-1681), oče znamenitega fizika Pietra, ki je pozneje prevzel Senguerdovo katedro za fiziko na univerzi v Leydenu.

5 VAKUUM NA KRANJSKEM

Odstavljeni knez se je z ženo in sedmimi otroki zatekel v svojo grofijo Wels, nato pa v Ljubljano in na rodno Kranjsko. Med lovom si je hladil jezo nad opotekanjem svoje sreče in se zabaval z znanstvenimi študijami. 3. 7. 1669 je od Janeza Antona Eggenberga kupil notranjski gospostvi Snežnik in Lož, prevzel pa je tudi postojnsko graščino.⁷⁰ Postojnsko jamo je opisal že Cluverij⁷¹ leta 1623 kot "veliko jamo s šumečo reko v votlem hribu pri Ljubljani". To in druga njegova dela so bila Kranjcem znana, saj so jih leta 1678 v Ljubljani ponujali kar pet.⁷² Humanist Cluverij se je uveljavil z zemljepisnimi raziskavami antike in bližnjega vzhoda. Po dolgih potovanjih v Nemčiji, Italiji, Franciji in Angliji se je ustalil na leydenski univerzi in prijateljeval z zdravnikom Thomasom Bartolinom.⁷³

Postojnsko jamo so v tem času že veliko obiskovali in raziskali podzemski tok Pivke celo miljo daleč.⁷⁴ Zato se je vedoželjni knez "blagega spomina" kot novi lastnik lotil lastnih raziskav. Leta 1673 je spustil enega svojih podložnikov po vrveh k vodi v reko pod čevelj debelim naravnim mostom v Postojnski jami. Kmet je bil varen ribolova in opremljen z ribiškimi mrežami,⁷⁵ saj so gospodarnega Turjačana še posebej privlačila ugibanja o podzemnem živalstvu, ki jih je bral v Agricolovih delih. Privezani mož je med počasnim spustom drsal po skali in končno prispel do vode. Njegovi pomočniki se niso preveč podvzivali, da bi svojega raziskovalca potegnili na varno. Bili so prav veseli, ko se je končno skobacal nazaj na most in v mreži prinesel ščuko, krapa in klana. Ribe niso bile posebno rejene, temveč bolj mršave. Turjačan je bil vseeno zadovoljen in je hotel naslednji dan ponoviti poskus. Tudi to pot je možu ponujal eno krono za trud.

Vendar kmet ni hotel več v globino, tudi če bi mu podaril celotni postojnsko gospostvo. Upiral se je na žive in mrtve: "Nič ne povem, kaj sem notri videl in slišal; pa tudi ne, zakaj nočem več dol!". Bil je tako prepričljiv, da ni pomagala niti knezova beseda. Nadaljnje raziskovanje so morali opustiti, saj novih prostovoljcev seveda ni bilo.

Leta 1679, poldrugo leto po Turjačanovi smrti, je Valvasor našel ostarelega jamskega ribiča in skušal od njega izvedeti podrobnosti o spustu.⁷⁶ Vendar možakar tudi to pot ni hotel ničesar pametnega povedati. Iz njegovega obnašanja je Valvasor domneval, da ga je v jami strašila prikazen. Pri raziskovanju mu je pomagal deželni glavar knez Janez Sigfrid Eggenberg, ki je medtem prevzel postojnsko graščino. Valvasor je z njim tesno sodeloval in mu je posvetil zemljevid Hrvaške na začetku 12. knjige *Slave*.⁷⁷ Lastnik Jame pri Postojni je bil tisti čas grof Cobenzl,⁷⁸ vnuk brata Janeza Rafaela Cobenzla.

Ko je neporočeni brat Volk Engelbert Turjaški umrl, je knez podedoval njegove posesti. Teden dni pred svojo smrtjo je knez 6. 11. 1677 združil graščine Poljane, Kočevje, Višnjo Goro, Belaj, Žužemberk in knežji dvorec v "fidejkomis", ki ga je lahko dedoval le prvorojenec v družini.

Za lov in lokalno politiko je Turjačan potreboval zveste kranjske plemiče. Službo pri knezu so najbolj izkoristili Verderberji, mitničarji iz Knežje Lipe v gospostvu Kočevje. Še preden je gospostvo prevzel Volk Engelbert Turjaški, so se povzpeli v plemiški stan. Ker je zapis "von Verd-erber" zvenel nekoliko nerodno, so se preimenovali v "von Erber" in končno v Erberg. Ob Turjačanovi podpori so kmalu prerasli Kočevsko in postopoma selili svoje posle v Ljubljano. Med poglobitnimi knezovimi poverjeniki je bil Kočevar Janez Danijel, poznejši baron Erberg, ded Avgušтина Hallersteina. Turjaški knez je Erbergu in drugim družabnikom ob lovskem ognju in prijetni kapljici pripovedoval o širnem svetu in o tedaj modnih vakuumskih poskusih.

Mlajša sestra Janeza Danijela Erberga, Marija, se je poročila s plemičem Matijo II. Jenčičem. Kmalu po poroki je Matija leta 1674 postal upravitelj turjaškega gradu Poljane. Njegov sin, fizik Sigmund Jenčič,⁷⁹ je na ljubljanskem kolegiju poučeval med letoma 1701 in 1705 ter med letoma 1713 in 1718. Gotovo se je spomnil stričevih zgodb o Turjačanovih in Gueri-

⁶⁸ Schneider, 1986, 398-399

⁶⁹ Wolfert Senguerd (Sengueroius, * 1646; † 1724)

⁷⁰ Smole, 1982, 379

⁷¹ Philippus Cluverius (* 1580 Gdansk; † 1622 Leyden)

⁷² Mayr, 1678, 71-72

⁷³ Thomas Bartholin (* 1616; † 1680)

⁷⁴ Kranjc, 1984, 36

⁷⁵ Valvasor, 1977, 53, 320; Valvasor, 1689, 4: 532

⁷⁶ Raisp, 1983, 144

⁷⁷ Reisp, 1983, 247

⁷⁸ Janez Filip Cobenzl († 1697)

⁷⁹ Sigmund Jenčič (* 24. 4. 1679 Poljane ob Kolpi; SJ 10. 10. 1698 Gradec; † 22. 4. 1718 Ljubljana)

ckejevih poskusih, ko je v petintrideseti izpitni tezi svoje ljubljanske študente fizike opozarjal na razlike v gostoti snovi, ki so omogočale delovanje vakuumskih črpalk.

Sin Janeza Danijela je bil pisec fizikalnih knjig Anton Erberg, zadnji dve leti rektor kolegija v Ljubljani. V svoji fiziki je obdržal Aristotelovo razporeditev poglavij.⁸⁰ V prvem delu razgovora O nastajanju in propadanju je Anton Erberg navajal svoja lastna in Magnijeva dela.⁸¹ Kapucin Magni⁸² je že leta 1646 samostojno opravil Torricellijevemu podoben poskus na dvoru Ladislausa⁸³ in Louise-Marie⁸⁴ v Varšavi. Kraljičin tajnik, Noyers,⁸⁵ je o dogodku takoj obvestil francoske fizike. Poljski dvor je bil zelo zavzet za znanost, saj je kraljica v palačo prinesla enega od prvih modelov Pascalovega kalkulatorja in pisala pisma Athanasiusu Kircherju (1602-1680). Raziskovalci iz observatorija Ujazdów v bližini Varšave so sodelovali s pariškimi astronomi Boullualdijem,⁸⁶ Pierrom Prierrom in Auzoutom.⁸⁷ Auzout je leta 1663 demonstriral uporabo teleskopa brez cevi,⁸⁸ pozneje pa je raziskoval vakuum. Za znanost se je zanimal tudi novi kralj Jan Kazimierz, zadnji vladar iz dinastije Vasa. Jan je bil pred poroko s polbratovo vdovo Louise-Marie de Gonzaque kardinal in jezuit, po odstopu s prestola pa je živel v Franciji.⁸⁹

Leta 1654 je Magni na Državnem zboru v Regensburgu opisal svoj poskus Guerickeju, Turjačanu in drugim.⁹⁰ Guerickejev oče je bil v mladih letih poslanec poljskega kralja in je razmere v Varšavi dobro poznal. Vendar Guericke ni povsem verjel Magniju, saj je medtem že nekaj slišal o Torricellijevih in Vivianijevih poskusih. Po prepiru je Magni, čeprav s težkim srcem, priznal Torricellijevo prioriteto.⁹¹

Magni je prvi natančno opisal prehajanje svetlobe skozi zrak in skozi vakuum.⁹² Njegova kritika Aristotelovega zavračanja obstoja vakuuma je bila najhujši izziv peripatetikom tistega časa. Kot kapucin je bil tudi sicer neprijeten sogovornik jezuitom. Med neprestanimi spori s sholastiki se je zatekel na Dunaj. Takrat je bil na višku svoje življenjske poti in je skušal

priti do kardinalskega klobuka. Turjačan je seveda raje videl kardinalski klobuk na svoji, kot na Magnijevi glavi; zato ni podprl svojega starega znanca Magnija. Ni se preveč jezil, ko je papež⁹³ leta 1661 izdal ukaz za aretacijo Magnija na Dunaju in za njegovo privedbo v Rim.⁹⁴ Magnijeve ideje so ostale še dolgo trn v peti vsem zagovornikom Aristotelovega nauka. Vnuk Turjačanovega mitničarja, Anton Erberg, se je še stoletje pozneje jezil na davno umrlega Magnija in na njegov opis vakuuma.

V drugem delu razgovora O nastajanju in propadanju je Anton Erberg obravnaval spremembe v snovi.⁹⁵ Navedel je vakuumске poskuse Torricellija, Huygensa, Boyla in Guerickeja. O Guerickejevih poskusih pred Turjaškim knezom v Regensburgu je veliko slišal že od svojega očeta in se ni povsem otrese Aristotelovih dvomov o možnosti gibanja kamna skozi vakuum. Možnost za obstoj vakuuma je razčlenil v II. razpravi in v drugem delu osmega razgovora III. razprave. V nasprotju z Magnijem je zagotavljal, da v naravi telesa ne morejo biti v praznem prostoru.⁹⁶ Mnenje je bilo še dokaj razširjeno v času mladosti Antona Erberga, vendar je bilo ob izidu njegove knjige že zastarelo.

Za vakuum so se zanimali tudi drugi Erbergi. Antonov bratranec, Bernard Ferdinand Erberg, je sto let po magdeburškem poskusu leta 1755 nabavil Guerickejevi magdeburški polkrogli za pouk pri ljubljanskih jezuitih. Antonov nečak, Hallerstein, je leta 1773 skupaj s sodelavci prvič predstavil vakuumске poskuse kitajskemu cesarju. V tistem času je pravnuk brata kneza Janeza Vajkarda Turjaškega, Herbert Turjaški,⁹⁷ postal leta 1770 profesor posebne in splošne fizike v Ljubljani.

Erbergi so posnemali svoje dobrotnike, Turjačane, pri nakupovanju znanstvene literature. Antonov stric, Franc Jakob Erberg, je 5. 2. 1680 kupil in prezidal hišo na današnjem Starem trgu številka 9 v Ljubljani in si v njej uredil bogato knjižnico.⁹⁸ Ker so mu vsi otroci pomrli, je hišo in knjižnico s številnimi deli o vakuumu podedoval njegov polbrat Janez Danijel.⁹⁹ V Ljubljani je Janez Danijel Erberg še naprej užival

⁸⁰ Hellyer, 1998, 374

⁸¹ Erberg, 1751, 3: 151

⁸² Valeriano Magni (Magnani, * 1586 Milano; † 1679)

⁸³ Ladislaus IV. Vasa (* 1585; † 1648, kraljeval 1632-1648)

⁸⁴ Louise-Marie de Gonzaque princesa Nevers (Gonzaga, * 1611; † 1667, kraljica od 1646)

⁸⁵ Pierre Des Noyers (* 1608; † 1693)

⁸⁶ Ismaël Boullualdi (Bullialdi, Billialdus, Bouilliau, Boulliau, * 1605 Loudin; † 1694/1695 opatija Saint Victor)

⁸⁷ Adrien Auzout (* 1622; † 1691)

⁸⁸ Helden, 1995, 196

⁸⁹ Targosz, 1971, 137-142

⁹⁰ Guericke, 1986, 92-93

⁹¹ Hellyer, 1998, 264

⁹² Guericke, 1986, 92-93, 108

⁹³ Aleksander VII. (papež med letoma 1655-1667)

⁹⁴ Gorman, 1994, 19, 21

⁹⁵ Erberg, 1751, 3: 161

⁹⁶ Erberg, 1751, 2: 47, 351-353, 3: 492-497

⁹⁷ Herward Auersperg (* 10. 3. 1733 Šrajbarski Turn; SJ 18. 10. 1749 Dunaj; † 21. 3. 1801 Ljubljana)

⁹⁸ Umek, 1991, 14

Schoockius de Scepticismo,	8
Schotti Magia universalis Naturæ & Artis,	4
Organum Mathematicum,	4
Arithmetica Practica,	8
Schola Steganographica,	4
Technica Curiosa,	4
Itinerarium Italiz,	12
Philosoph,	M
Schultheßij	

Slika 6: Stran Mayrove knjigotrške ponudbe Ljubljančanom iz leta 1678, ki na dnu ponuja tudi šest Schottovih del o Guerickejevih in drugih poskusih

podporo Turjaških knezov. Kneza Janeza Vajkarda je nasledil najstarejši sin,¹⁰⁰ ki se je kmalu po očetovi smrti leta 1678 poročil z grofico iz mogočne družine Herbersteinov.¹⁰¹ Leta 1696 je Janezu Danijelu Erbergu podelil v fevd zemljišče ob Mlinščici, za nameček pa še štiri in pol kmetije na Pšati.¹⁰² Medtem je Erbergova knjižnica naraščala in kmalu dosegla svojo vzornico v bližnjem knežjem dvorcu. Karel Dežman je vsaj del Erbergove knjižnice kupil za današnji Narodni muzej v Ljubljani, Turjaške knjižne zaklade pa so stoletje pozneje, leta 1982, razprodali mimo Kranjcev, ki imamo seveda slej ko prej preplitve žepe.

Schönleben,¹⁰³ sin ljubljanskega meščana, je med letoma 1655 in 1663 popisal in katalogiziral knjige Turjaškega grofa Volka Engelberta. Leta 1655 je vpisal lastniški zaznamek v Claviusovo obrambo gregorijanske reforme koledarja proti Keplerjevemu učitelju Maestlinu (1588), ki jo danes hrani knjižnica Bizzell univerze v Oklahomi. Leta 1663 je Schönleben popisal Kircherjevo "De Prodigiosis". Majhno knjižico na sto treh straneh je Schott¹⁰⁴ ponatisnil za stranjo tristo sedem svojega dela "Joco-Seria". Jeseni 1678 je Mayr ponujal Kircherjevo "De Prodigiosis" v Ljubljani v izdaji iz leta 1661 ali 1666. Turjačan je imel tudi Kircherjevo "Ars Magna" iz leta 1646. Manj verjetni lastnik Kircherjeve "Ars Magna" je bil sin bratranca deželnega glavarja, grofa Volka Engelberta. Imel je enako ime in je tri desetletja služil kot deželni maršal. Živel je v sosednji turjaški grofovski palači in na turjaškem gradu, Dizmovi plemiški bratovščini pa se je priključil z nadimkom Bogoljubni.¹⁰⁵



Slika 7: Prva Guerickejeva črpalka: eden izmed opazujočih plemičev bi bil prav lahko naš Turjačan (Schott, 1657, 445)

Mayr je na jesen 1678 Ljubljančanom ponudil drugo izdajo "Ars Magna" iz leta 1671. Leta 1697 so Turjačani svojo "Ars Magna" dali ljubljanskim jezuitom, ki so se ravno pripravljali na odprtje višjih študijev v Ljubljani. Kircher je v tem delu obravnaval Torricellijev poskus z barometrom.¹⁰⁶

Nekaj mesecev po smrti kneza Janeza Vajkarda je Mayr Ljubljančanom ponudil dela tedaj najpomembnejših raziskovalcev vakuuma: Kircherja, Fabra,¹⁰⁷ Schotta, Boyla,¹⁰⁸ in londonske Philosophical Transactions.¹⁰⁹ Ponujal je Schottovo "Technica curiosa" iz leta 1664, kjer je v prvem delu opisal poskuse z Guerickejevo zračno črpalko. Petični Ljubljančani so si lahko kupili Schottovo novo "Magijo", kjer je v sedmi knjigi "Magia Aerotechnica" opisal jezuitsko raziskovanje vakuuma in poskus z magdeburškima polkroglama.¹¹⁰ Ljubljančani so lahko v bogato ilustriranih knjigah preverili resničnost regensburških zgodb, ki jih je znal pripovedovati pokojni turjaški knez.

Mayr je popisal štiri knjige Johanna Christopha Sturma (1635–1703),¹¹¹ profesorja matematike na univerzi Alttrof. Sturm je zagovarjal Fabrovo teorijo vakuuma in opisal Guerickejeve poskuse.¹¹²

⁹⁹ Janez Danijel Erberg (* 14. 12. 1647 Kočevje; † 5. 3. 1716 Dol ali Ljubljana (SBL, 1: 162; Umek, 1991, 13))

¹⁰⁰ Janez Franc Ferdinand Turjaški (* 1655; † 1706)

¹⁰¹ Marija Ana grofica Herberstein (* 1660; † 1726)

¹⁰² Umek, 1991, 15

¹⁰³ Janez Ludvik Schönleben (* 1618; † 1681)

¹⁰⁴ Kaspar Schott (Gaspar, * 1608 Königshofen; SJ 1627 Würzburg; † 1666 Würzburg)

¹⁰⁵ Volk Engelbert IV. Turjaški (Wolfgang, * 6. 11. 1641; † 2. 3. 1709 (Lubej, 2002, 44))

¹⁰⁶ Kircher, 1664, 26-29; Mayr, 1678, 79

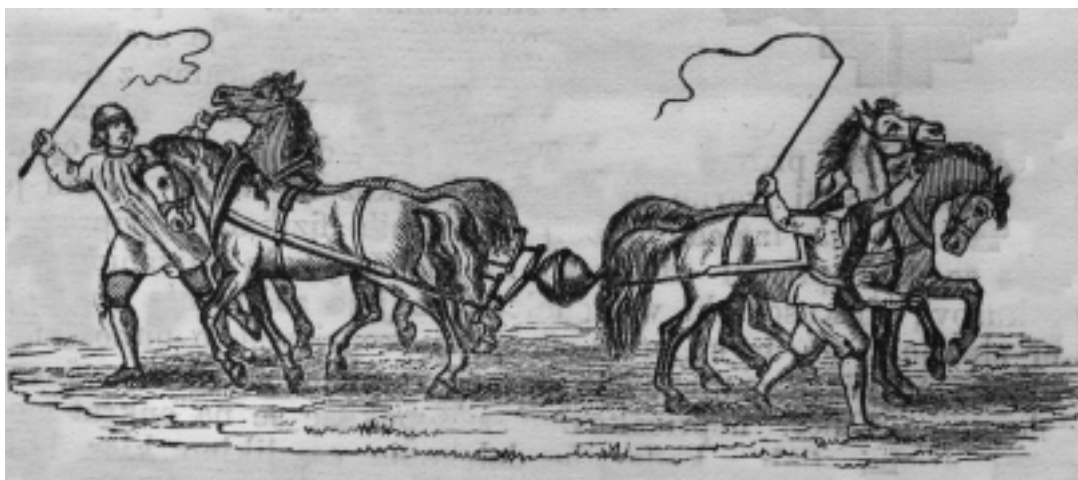
¹⁰⁷ Mayr, 1678, 53, 74. Honoratio Fabri (* 1606/7 Le Bugey v Belley; SJ 1626 Avignon; † 1688 Rim)

¹⁰⁸ Mayr, 1678, 51-52. Robert Boyle (* 25. 1. 1627 Grad Lismore na Irskem; † 30. 12. 1691 London)

¹⁰⁹ Mayr, 1678, 84

¹¹⁰ Schott, 1677, 518-533, 554-555; Mayr, 1678, 89.

¹¹¹ Johann Christoph Sturm (* 3. 11. 1635 Hippoltstein; † 25. 12. 1703 Altdorf)



Slika 8: Poskus z magdeburškima polkroglama, kot si ga je dve stoletji po prvi izvedbi zamislil Slovenec Ivan Tušek (* 1835; † 1877) (Tušek, 1869, 94)

Mayrova ponudba temeljnih del o tedanji vakuumski tehniki kaže, da Ljubljana pred tremi stoletji ni bila zakotno mesto brez stika z napredkom pri raziskovanju vakuuma v tedanjih evropskih središčih. Največ knjig sta pri Mayru kupovala sin prvega turjaškega kneza in sin njegovega kočevskega mitničarja, Franc Jakob Erberg.

6 SKLEP

Turjaški knez je seznanil nadobudne Kranjce z začetki vakuumske tehnike v cesarstvu, gotovo pa je pozornim poslušalcem znal povedati še kakšno pikro o angleških dosežkih. Med lovom po svojih gozdovih je pomočnikom, tlačanom in plemičem pripovedoval o nenavadnih lastnostih vakuuma. Njegove zgodbe so padle na plodna tla, saj so bili med njegovimi poslušalci tudi dobri lovci, belokranjski uskoki Lienhardt Panian, Anndre Panian in Jurco Panian s Tanče Gore (Tannzperg)¹¹³ in Dragovanje vasi (Dragowana waas, Dragäiendorf).¹¹⁴

Časi so se kmalu močno spremenili. V desetletjih po regensburških poskusih so kralji še imeli odločilno vlogo pri promociji poskusov. Swedenborg,¹¹⁵ član švedske akademije znanosti, je svoje izume še kazal kralju Karlu II. Leta 1721 in 1722 je opisal novo hidravlično vakuumsko črpalko. Stoletje po prerekanju med Turjačanom in Guerickejem v Regensburgu je vnuk knezovega mitničarja, Bernard Ferdinand Erberg, leta 1755 nabavil magdeburški polkrogli za svoje študente na ljubljanskem kolegiju. Vsaj tedaj, če že ne v času prvega turjaškega kneza, so lahko Guerickejevemu poskusu ploskali tudi štiristo kilo-

metrov jugovzhodno od Regensburga, v beli Ljubljani.

Minila je polovica stoletja. Kneževina Münsterberg je ostala do leta 1791 v lasti knezov Turjaških, ki so prav tedaj dobili vojvodski naslov. Do Napoleonove ukinitve nemškega cesarstva so v svoji kočevski vojvodini kovali lasten denar. Tudi turjaški varovanci Erbergi so skokoma napredovali. Podobno kot je bil prvi knez Turjaški vzgojitelj prestolonaslednika Ferdinanda IV., je postal potomec njegovih nekdanjih mitničarjev, baron Jožef Kalasanc Erberg,¹¹⁶ spomladi 1809 vzgojitelj prestolonaslednika Ferdinanda I.¹¹⁷ Res pa je, da njuna gojenca nista zelo blestela na habsburškem nebu.

Pol stoletja pozneje je Geissler v Bonnu izpopolnil Swedenborgovo črpalko za prve katodne elektronke. Leta 1867/68 so na gimnaziji v Ljubljani ponovno nabavili magdeburški polkrogli. Naslednje leto so si vrli Slovenci že lahko prebrali opis Guerickejevega poskusa v domačem jeziku: "...Te polkrogli, ki sta poprej same od sebe padle narazen, tiščal je zdaj tlak tako drugo ob drugej, da jih šest parov konj, zapreženih z vsake strani v obroča, ni moglo narazen raztrgati".¹¹⁸ Seveda je bil avtor zapisa v nasprotni politični stranki kot Turjačani; zato knezovega prispevka k znamenitemu poskusu ni niti omenil. Tako je kranjski prispevek k zgodnji vakuumski tehniki počasi utonil v pozabo.

Minilo je novih sto let in že so se blizu krajev, kjer sta se Turjaški in Guericke nekoč pričkala o vakuumu, razvila pomembna vakuumski podjetja. Gerätebau-Anstalt Balzers v Liechtensteinu je zrasel tristo kilometrov jugozahodno od Regensburga, sodobna

¹¹² Mayr, 1678, 91, 119

¹¹³ Kos, 1991, 292

¹¹⁴ Kos, 1991, 332, 337

¹¹⁵ Emmanuel Svedenborg (* 1688 Stockholm; † 1772 London)

¹¹⁶ Jožef Kalasanc Ferdinand Avguštin Erberg (* 28. 8. 1771 Ljubljana; † 10. 7. 1843 Dol)

¹¹⁷ Ferdinand I. (*1793; † 1875; avstrijski cesar med letoma 1835-1848)

¹¹⁸ Tušek, 1869, 93-94.



Slika 9: Bržkone zadnja fotografija knežjega dvorca v Ljubljani, posneta po potresu leta 1895

kranjska podjetja pa niso veliko dlje. Prav bi bilo, da bi kneza Janeza Vajkarda Auersperga, prvega kranjskega vakuumista, sodobni Kranjci počastili s primernim spominskim obeležjem na njegovem rojstnem gradu v Žužemberku ali pa v knežjem dvorcu, današnjem NUK-u, kjer je odrasel in se tja povrnil na stara leta.

7 LITERATURA

- Borisov, V. P. 2002. Izobratenie vakuumnoga nasosa i krušenje dogmi "bojazni pustoti". *VIET*. 23/4: 650-671
- Boyle, Robert. 1670. *Tractatus de Cosmicis Rerum Qualitatibus* (Tractatus about the cosmical qualities of things etc.)
- Boyle, Robert. 1672. *Tractatus de Aëre; Specimen de Origine & Vitutibus Gemmarum* (An essay about the origins and virtue of Gems)
- Clavius, Christopherus. 1588. *Novi calendari romani apologia. Adversus Michaellem Maestlinum Gaepplingensem, in Tubingensi Academia Mathematicum, tribus libris explicata. Auctore Christophoro Clavio Bambergensi Societate Iesu. Romae: Sanctius, & Soc. Schönlebenov ekslibris: "S. R. J. comitis ab Auersperg Sup. Carnia Capitanei Catal: Infedr: An. 1655"*
- Cluverius, Philippus. 1623. *Italia Antiqua*
- Erberg, Anton. 1750, 1751. *Cursus Philosophicus Methodo Scholastico Elucubratus per Reverendum Patrem Antonium Erber, è Societate Jesu AA. LL. Philosophiae necnon SS. Theologiae Doctorem, et in alma, ac celeberrima Universitate Graecensi Cancellarium Emeritum. I-III. Viennae: Typis Joannis Thom. Trattner. Univ. Typol. Viennae Austriae: sumptibus Caspari Schmidt*
- Fabri, Honoratius. 1666. *Tractatus duo de Plantis & de Generatione animalium, posterior de Homine. Paris. Ponatis: Normbergae 1677*
- Gorman, Michael John. 1994. Jesuit Explorations of the Torricellian Space: Carp-Bladders and Sulphurous Fumes. *MEFRIM*. 106/1: 7-32
- Granda, Stane. 1980. Razpad posesti knezov Auerspergov na Kranjskem. *Kronika*. 28: 200-212
- Grant, Edward. 1981. Much Ado About Nothing. *Theories Of Space and Vacuum From the Middle Ages To the Scientific Revolution*. Cambridge: University Press
- de Guericke, Otto. 1672. *Experimenta Nova (in vacantur) Magdeburgica De Vacuo Spatio. Amsterdam. Ponatis: 1986. Neue "Magdeburgische" Versuche uber den leeren Raum. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft M. B. H*
- Hablani, M. H. 1984. Comments on the history of vacuum pumps. *History*. 17-23
- Helden, Albert van. 1995. *The Telescope from Galileo to Today. Occasioni Galileani*. V. Trieste: Lint. 189-203
- Hellyer, Marcus. 1998. *The Last Of the Aristotelians: the Transformation Of Jesuit Physics in Germany 1690-1773. Disertacija. Dan Diego: University of California*
- History of Vacuum Science and Technology*. (ur. Madey in Brown William C.). 1984. New York: American Vacuum Society, American Institute of Physics. 9-16
- Kircher, Athanasius. 1646. *Ars Magna. Romae. Ekslibris: Wolfis. Engelb. S. R. J. Com: AB Auersperg Sup. Cap. Carm: Bibliothec. Philosophici 1697*
- Kircher, Athanasius. 1661. *Athanasii Kircheri Soc. Iesu Diatribe. De prodigiosis crucibus, quae tam supra vestes hominum, quam res alias, non pridem post ultimam incendium Vesuvij Montis Neapoli comparauerunt. Romae: Sumptibus Blasij Deuersin, Romae: Vitalis Mascardi. Ponatis: 1666. Romae: Blasius Deversus*
- Kos, Dušan. 1991. *Urbarji za Belo Krajino in Žumberk. Ljubljana: SAZU*
- Kranjc, Andrej. 1984. Raziskovanje vodnih jam na Slovenskem. *Kronika*. 32: 35-43
- Lopašič, Radoslav. 1879. *Karlovac, poviest i mjestopis grada i okolice. Zagreb*
- Lubej, Uroš. 2002. Auerspergi in njihova grofovska palača v Ljubljani. *Preobrazba Turjaške palače. Ljubljana: Mestni muzej. 19-50*
- Madey, Theodore E. 1984. Early applications of vacuum, from Aristotle to Langmuir. *History*. 9-16
- Mayr, Joannis Baptistae. 1678. *Catalogum Librorum qui Nundinis Labacensibus Autumnalibus in Officina Libraria. Ljubljana. Ponatis. 1966. Ljubljana: MK*
- Rain, Joannes Frideric. 1680. *Praeservativum universale naturale. A natura et arte depromptum in omni morborum genere est Lapis Philosophorum, cuius possibilitas, realitas, existentia et praeparatio, quodque licet, is solus sit unicus morborum debellator Hercules. Contra Jacobum Joannem Wenceslaum Dobrzanski, de Nigro Ponte, Philosophia et Medicinae Doctorem, Lapidem Philosophorum eiusque indefinitam in omnibus morbis curandi excellentiam negantem. Remonstratur editore Joanne Friderico e Rain, Ad Stermoll et Radelsegch, incliti Ducatus Carnioliae causarum Aulicarum Provincialium Assessore, etc. Labaci: Typis Joannis Baptistae Mayr*
- Reisp, Branko. 1983. *Kranjski polihistor Janez Vajkard Valvasor. Ljubljana: MK*
- Schneider, Ditmar. 1986. *Auf den Spuren Guericke's. Phys.BI. 42: 397-399*
- Schneider, Ditmar. 2002. Ein Leben für die alte Magdeburg*
- Schoedler, Friedrich Karl Ludwig. 1860. *Das Buch der Natur. 11. Auflage. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn. Knjiga prirode, Fizika. Poslovenil Ivan Tušek, profesor na véliki realki v Zagrebu, Ljubljana, 1869*
- Schott, Kaspar. 1657. *Magia universalis naturae et artis sive recondita naturalium & artificialium rerum scientia... Herbiopoli. Ponatis: Bamberg 1671, Bibliopolae Francofurtensis 1677*
- Schott, Kaspar. 1664. *Technica curiosa sive mirabilia artis libris XII. Herbiopoli*
- Schott, Kaspar. 1672. *Joco-Seriorum naturae et artis sive magiae naturalis centuriae tres: das ist drey-hundert Nutz und lustige Sätze allerhand... Frankfurt am Main*
- Shapin, Steven in Simon Schaffer. 1985. *Leviathan and the Air Pump. Hobbes, Boyle, and the Experimental Life. New Jersey: Princeton University Press. Francoski prevod. 1993. Paris: Éditions de Découverte*
- Smole, Majda. 1982. *Graščine na nekdanjem Kranjskem. Ljubljana: DZS*
- Sparnaay, M. J. 1992. *Adventures in vacuum. Amsterdam: North-Holland*
- Sturm, Johann Christoph. 1670. *Scientia cosmica, sive Astronomia tam Theoretica, quam Sphaerica. Normbergae*
- Sturm, Johann Christoph. 1670. *Des unvergleichischen Arhimedes. Normbergae*
- Sturm, Johann Christoph. 1676-1685. *Philosophiae Naturalis & Mathematicum Prof. Publ. Collegium experimentale sive curiosum. Normbergae*
- Umek, Ema. 1991. *Erbergi in Dolški arhiv. Ljubljana: Arhiv republike Slovenije*
- Valvasor, Janez Vajkard. 1689. *Die Ehre dess Hertzogthums Crain. Laybach-Nürnberg: Wolfgang Moritz Endter. Delni prevod: 1977. Ljubljana: MK*

NASVETI

PRIPRAVA ATOMSKO ČISTIH POVRŠIN

Rok Žitko

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

Izpopolnitev tehnik za doseganje ultravisokega vakuumu ter postopkov za pripravo atomsko čistih površin so omogočili pravi zagon fizike in kemije površin. Površino imamo navadno za atomsko čisto, če je število površinskih nečistoč manjše od nekaj odstotkov monoplasti. Takšna stopnja čistoče je zadovoljiva za številne meritve, saj so lastnosti površine tedaj že blizu idealnim. V nekaterih primerih pa že neznatna količina površinskih nečistoč vodi k bistveno spremenjenim lastnostim površine. Prav posebno občutljive so na primer nekatere metastabilne površinske rekonstrukcije. Izredno čiste podlage so potrebne tudi za pripravo tankih plasti z epitaksijo in pri poizkusih s posameznimi molekulami z uporabo vrstičnega tunelskega mikroskopa.

Najbolj pogoste (in trdovratne) nečistoče so ogljik, kisik, žveplo, klor in fosfor, v nekoliko manjši meri pa še dušik, kalcij, silicij, bor in magnezij ⁽¹⁾. Vrste nečistoč, ki jih navadno zaznamo na površinah, so seveda odvisne od snovi, iz katere je vzorec. Na primer na površinah bakra največkrat najdemo ogljik, kisik in žveplo, na železu pa ogljik, žveplo, kisik, dušik, fosfor in klor. Včasih so kupljeni materiali nečisti, ker zanje še niso poznani učinkoviti postopki za ločevanje snovi. V hafniju je tako navadno okoli 3 % kemijsko zelo sorodnega cirkonija ⁽¹⁾. Ker cirkonij difundira iz notranjosti vzorca na površino, je čiščenje izjemno dolgotrajno.

Obstaja veliko postopkov za pripravo atomsko čistih površin, štirje najbolj učinkoviti in najpogosteje uporabljeni pa so:

- 1) pregrevanje vzorca v ultraviskem vakuumu ali v atmosferi reaktivnega plina
- 2) jedkanje površine z ionsko erozijo
- 3) in-situ lomljenje ali cepljenje kristalov
- 4) priprava plasti z epitaksijo.

V primeru monokristalnih vzorcev je izbira tehnike za izbran material močno odvisna tudi od kristalografske orientacije površine, ki jo želimo dobiti ⁽¹⁾. Pogosto moramo zaporedoma uporabiti več različnih postopkov, da dobimo zadovoljiv rezultat.

Predhodna (ex-situ) obdelava površin

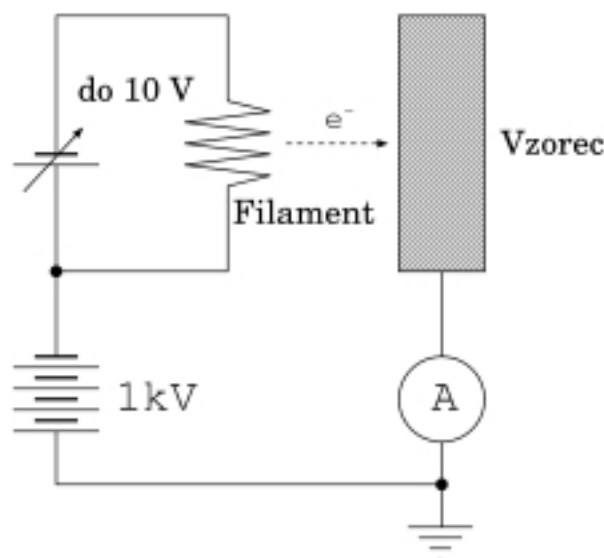
Vzorce moramo navadno predhodno obdelati, preden jih vstavimo v vakuumski sistem. Pogosto jih

mehansko, kemijsko ali elektrokemijsko poliramo, da dobimo zadosti gladko površino. Pri tem se moramo zavedati, da se lahko med obdelavo vzorec kontaminira. Površine razmastimo z ultrazvočnim čiščenjem v etanolu, trikloretilenu, acetonu ali izopropanolu, ostanke topila pa moramo temeljito odstraniti (na primer s segrevanjem vzorca).

Čiščenje s segrevanjem vzorcev v vakuumski komori

Pregravanje vzorcev v vakuumu je navadno prvi korak čiščenja. S segrevanjem povzročimo desorpcijo šibko vezanih površinskih nečistoč, kot sta na primer voda in ogljikov monoksid.

Vzorce lahko pregravamo z omskim gretjem. Polprevodnike (na primer silicij) lahko segrevamo preprosto tako, da tok spustimo skozi sam vzorec. Če pa vzorec nima primerne upornosti (kovina ali dober izolator), ga mehansko pritrdimo na nosilec iz čistega molibdena ali volframa in segrevamo nosilec. Vodniki morajo seveda imeti nizko upornost v primerjavi z nosilcem. Primerne so na primer debele bakrene žice, pri tem pa moramo biti pozorni na morebitne težave z odvajanje toplote, saj so vakuumski skozniki občutljivi za visoke temperature in se hitro poškodujejo.



Slika 1: Postavitev pri pregravanju vzorca z elektronskim curkom. Z ampermetrom merimo tok elektronov, ki padajo na vzorec, in tako lahko ocenimo moč segrevanja

Zelo učinkovita tehnika segrevanja je obstreljevanje vzorca (ali nosilca vzorca) s hrbtne strani z elektroni.

V neposredno bližino vzorca postavimo grelni žičko, ki jo segrevamo s tokom. Med vzorcem in žičko vzpostavimo potencialno razliko okoli 1 kV, tako da pospešeni elektroni trkajo v vzorec in ga tako segrevajo (slika 1). V komori moramo seveda imeti zadosti dober vakuum, da elektroni nemoteno letijo od izvira do tarče, torej vsaj 10^{-3} mbar. Majhen vzorec bakra na dvajsetgramskem nosilcu iz jekla lahko tako brez težav segrejemo na $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ v dveh minutah. Za izvir elektronov uporabimo kar volframovo žičko iz avtomobilske žarnice (12 V, 50 W), ki smo ji odbrusili stekleno bučko.

Med segrevanjem merimo temperaturo površine nekontaktno z optičnim pirometrom skozi okno vakuumskega sistema. Ceneje, vendar manj natančno, pa se da temperaturo meriti tudi z uporabo termočlena, ki se dotika vzorca ⁽²⁾.

Vzorec lahko čistimo tudi s pregrevanjem v atmosferi reaktivnega plina ali plazme ⁽³⁾. Tako lahko odstranimo nekatere trdovratne nečistoče, na primer ogljik na površini niklja in drugih elementov iz sredine periodnega sistema ⁽¹⁾. Ogljik odpravimo v kisikovi atmosferi. Vzorec najprej segrejemo na visoko temperaturo v UHV, tako da nečistoče difundirajo na površino, nato pa temperaturo nekoliko znižamo, da omejimo nadaljnjo difuzijo. V vakuumski sistem potem vpustimo zelo čist kisik, ki reagira z ogljikom in tvori lažje odstranljive okside. Na podoben način lahko potem kisik in okside odstranimo v vodikovi atmosferi, saj nastanejo hlapni hidridi ⁽¹⁾.

Vzorec, ki je že bil očiščen, a je v vakuumski komori že tako dolgo, da so se na površino adsorbirali residualni plini, najlažje pripravimo za meritve tako, da ga za kratek čas močno segrejemo (angl. *flashing*).

Jedkanje z ionsko erozijo

Pri jedkanju z ionsko erozijo (angl. *ion beam sputtering*) površino obstreljujemo z visokoenergijskimi (okoli 1 keV) ioni žlahtnih plinov, na primer argona ali neona. Tako s površine odstranimo adsorbirane atome nečistoč in nekaj površinskih plasti podlage. S tem tudi močno razbrazdamo površino in porušimo kristalno ureditev. Zato moramo po jedkanju vzorec močno segreti (na temperaturo od 50 do 80 odstotkov temperature tališča), s čimer iz površine odstranimo ujete in adsorbirane atome žlahtnih plinov, nato pa s popuščanjem dosežemo rekristalizacijo površine. Celoten postopek erozije in popuščanja moramo večkrat ponoviti; po vsakem obstreljevanju z ioni površino popuščamo in preverimo čistost in urejenost površine z meritvijo LEED in spektra AES.

Čiščenje poteka tako, da vakuumsko komoro napolnimo s čistim žlahtnim plinom, pogosto argonom, do tlaka okoli 10^{-6} mbar. Površino nato obstreljujemo z ioni argona, ki nastajajo v ionski puški. Ioni nastanejo ob trkih elektronov z atomi plina, nakar jih pospešimo z napetostjo do 1000 V. Tipična gostota ionskega toka je nekaj $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Pomembno je, da je ionski curek čim bolj homogen, da je jedkanje prostorsko enakomerno. Zato imajo ionske puške elektronsko optiko, s katero lahko curek fokusiramo. Hitrost jedkanja površine je odvisna od vrste parametrov: mase in energije ionov, materiala in kristalne orientacije površine, vpadnega kota ionov in temperature površine. Kot primer naj navedemo površino Cu(111), pri kateri z ioni argona odstranimo približno eno monoplast na minuto, če je energija ionov 1 keV, gostota toka $10\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ in vpad pravokoten.

Ključnega pomena je, da imamo med obstreljevanjem v komori čim manj residualnih plinov (na primer CO), saj se tudi ti plini ionizirajo in trkajo v površino, kjer se adsorbirajo ali celo implantirajo globlje v vzorcu.

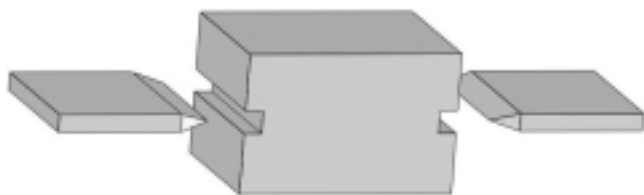
Priporočljivo je, da vzorce močno in zadosti dolgo predhodno pregrevamo, tako da odstranimo tudi nečistoče iz notranjosti vzorca. Te bi v nasprotnem primeru segregirale na površino med popuščanjem in čiščenje bi morali velikokrat ponoviti, da bi dobili zadosti čisto površino.

Z ionsko erozijo težje čistimo električno neprevodne površine, ki se nabijejo in ustvarijo odbojno električno polje na površini. V tem primeru lahko hitrost jedkanja povečamo tako, da sočasno površino obstreljujemo tudi z elektroni.

Lomljenje in cepljenje kristalov

Pogosto uporabljen postopek je cepljenje kristalov v samem vakuumskem sistemu. Ker se kristali cepijo vzdolž določenih kristalnih ploskev, lahko tako dobimo čiste in kristalografsko kvalitetne površine, ki so v primeru večatomnih kristalov v splošnem stehiometrične. Najbolj pogosti površinski defekti, ki nastanejo kot posledica cepljenja, so površinske stopnice ⁽⁴⁾.

Cepimo lahko le trdne kristale, ki so krhki, na primer alkalne halide (NaCl, KCl), okside (ZnO, TiO₂, SnO₂), polprevodnike (Ge, Si, GaAs) in plastne materiale (grafit). Cepljenje ni primerno za pripravo površin mehkih vzorcev, lahko pa naredimo tudi takšne materiale primerno krhke, če jih in-situ ohladimo na zelo nizke, kriogene temperature. Krom lahko na primer zelo lepo cepimo pri temperaturi tekočega helija ⁽⁵⁾. Čiste površine nekaterih snovi (kot



Slika 2: Cepljenje kristala z dvema nožema

so litij, talij in indij) lahko v vakuumu pripravimo tudi tako, da jih postružimo ⁽¹⁾.

Vzorec (monokristal) moramo pred cepljenjem primerno orientirati, tako da ostro rezilo preseka kristal v ravno pravi kristalografski smeri. To najlaže naredimo tako, da na dveh straneh kristal predhodno zarežemo, s čimer definiramo ploskev cepljenja. V vakuumu kristal stisnemo med dva jeklena noža (angl. *double wedge technique*), slika 2. Udarec prenesemo na kristal preko vakuumskega skožnika ali pa z uporabo kladivca, ki ga sproži elektromagnet.

S cepljenjem lahko dobimo samo nekatere izmed površin ⁽⁴⁾. Kristalov z ionsko vezjo na primer ne moremo cepiti vzdolž polarnih ploskev, saj bi s tem ločili pozitivne in negativne ione, med katerimi deluje močna vez. Kristal pa se preprosto cepi vzdolž nepolarnih ploskev.

Kakovost nastale površine je odvisna od adhezijske energije dane površine: kristal najlaže cepimo vzdolž ploskev, kjer je ta energija nizka. Težave lahko nastanejo, če obstajajo druge ploskve, ki imajo prav tako nizko energijo in ki so od izbrane ploskve naklonjene za majhen kot. V tem primeru dobljena površina ne bo idealna ploskev, temveč bo sestavljena iz večjega števila manjših ploskev ⁽⁴⁾. Rezultat je odvisen tudi od hitrosti cepljenja: nekatere kristale lahko cepimo tako, da postopoma povečujemo pritisk nanje, pri drugih pa dobimo lepe ploskve le tedaj, ko udarec sprožimo hitro.

Nekatere plastne kristale, ki imajo kemijsko relativno inertne površine, kot so na primer grafit in trihalkogenidi prehodnih kovin, lahko "olupimo" kar na zraku. To najlaže storimo z uporabo lepilnega traku, s katerim prelepimo površino. Ko trak odtrgamo, s tem odstranimo nekaj površinskih plasti in v idealnem primeru dobimo atomsko čisto površino. Če vzorec zadosti hitro (v nekaj minutah) prenesemo v vakuumski sistem, je nova površina sprejemljivo čista za površinske meritve.

Epitaksija

Nekaterih površin ne moremo pripraviti z nobenim od zgoraj opisanih postopkov. Do tega pride na primer pri kristalnih spojin, če kristala ne moremo cepiti in če pri ionski eroziji hitrosti jedkanja za različne atome niso enake, saj v tem primeru površina ne bi bila

stehiometrična in imeli bi veliko število defektov. Za nekatere snovi (polprevodnike III-V, kot so GaAs, GaAlAs) je zato priprava tankih plasti z epitaksijo edini poznani postopek za pripravo velike čiste površine. Tudi nekatere druge površine, na primer površine redkih zemelj, raje pripravimo v obliki tankih plasti. Pri epitaksiji z molekulskim curkov (angl. *molecular beam epitaxy*, MBE) na segreto atomsko čisto podlago usmerimo curek atomov ali molekul ⁽²⁾. Atomi tvorijo kristalno plast, ki se kristalografsko ujema s podlago, torej epitaksijsko plast. Ker postopek poteka v ultravisokem vakuumu, so dobljene tanke plasti atomsko čiste.

Drugi postopki

Šibko vezane (fiziadsorbirane) nečistoče lahko odstranimo z elektronsko stimulirano desorpcijo: vzorec obstreljujemo z nizkoenergijskimi elektroni (100 eV), ki povzročijo desorpcijo adsorbatov ⁽⁶⁾. Desorpcijo nečistoč lahko povzročimo tudi z laserskim obsevanjem. Površino obsevamo s kratkimi (40 ms) pulzi visoke moči. Ker toplota v tako kratkem času ne more disipirati, s površine odletijo površinski atomi. Ta postopek je zelo primeren za čiščenje izolatorjev in polprevodnikov ⁽⁶⁾.

Preverjanje čistosti površin

Kemijsko čistost površine preverjamo z Augerjevo elektronsko spektroskopijo (AES), rentgensko fotoemisijsko spektroskopijo (XPS) ali z masno spektroskopijo sekundarnih ionov (SIMS). Z AES lahko zaznamo nečistoče, ki jih je več kot en promil monoplasti, XPS pa ima prag zaznavanja še desetkrat nižji. Metoda SIMS je sicer veliko bolj občutljiva, kot sta predhodni, vendar je destruktivna ⁽⁷⁾. Kristalno ureditev nadzorujemo z uklonom nizkoenergijskih elektronov (LEED) ⁽⁴⁾.

Namesto sklepa nadaljnje branje

Zelo uporaben pregledni članek je vir ⁽¹⁾, kjer so podrobno opisani postopki za pripravo atomsko čistih površin za štiriinšedemdeset elementov. V istem viru najdemo tudi naslednjo strategijo za čiščenje razsežnih vzorcev, za katere še ni poznan postopek čiščenja. Vzorec najprej razplinjamo (degaziramo) pri temperaturi malo pod tališčem. Nato ga pri sobni temperaturi jedkamo z ionsko erozijo (Ar, 1 keV, nekaj $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), dokler s kemijsko specifičnim merjenjem ne ugotovimo, da je površina atomsko čista. Nato vzorec popuščamo s temperature, enake dvema tretjinama tališča, pri tem pa opazujemo sestavo površine. Če na površino segregira kakšna nečistoča, moramo poiskati temperaturo največje koncentracije

te nečistoče in pri tej temperaturi nadaljevati ionsko erozijo.

LITERATURA

¹R. G. Musket, W. McLean, C. A. Colmenares, D. M. Makowiecki, W. J. Siekhaus *Preparation of atomically clean surfaces of selected elements: a review*, Appl. Surf. Sci. **10** (1982), 143–207

²J. R. Arthur *Molecular Beam Epitaxy*, Surf. Sci., **500** (2002), 189

³R. E. Thomas, M. J. Mantini, D. P. Malta, S. V. Hattangady, R. J. Markunas, *Carbon and oxygen removal from silicon(100) surfaces by remote plasma cleaning techniques*, J. Vac. Sci. Tech., **10** (1992), 817

⁴H. Lüth, *Surfaces and Interfaces of Solid Materials*, Springer Verlag, Berlin, tretja izdaja, 1995

⁵O. Y. Kolensnychenko, R. de Kort, H. van Kempen, *Atomically flat ultra-clean Cr(001) surfaces produced by cleavage of a single crystal: scanning tunneling microscopy and spectroscopy study*, Surf. Sci., **490** (2001), L573

⁶J. Verhoeven, *Techniques to Obtain Atomically Clean Surfaces* The Journal of Environmental Sciences **9** (1979)

⁷L. C. Feldman, J. W. Mayer, *Fundamentals of surface and thin film analysis*, North-Holland, 1986

DOLOČANJE DEBELINE TANKIH PLASTI IZ MERITVE PROFILA STOPNICE

Miha Čekada

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

UVOD

O različnih metodah merjenja debeline tankih plasti smo v Vakuumistu ⁽¹⁾ že pisali. Kot eno najbolj uporabnih metod smo opisali tudi merjenje s profilometrom. Pred nanosom tanke plasti del vzorca zastremo s primerno masko, ki prepreči rast plasti na tem delu. Po končanem nanosu masko odstranimo in s profilometrom pomerimo prečni profil vzorca. Na profilu se prehod med golo podlago in tanko plastjo kaže v obliki stopnice. Višina te stopnice je enaka debelini plasti. Soroden način priprave stopnice je jedkanje (ali kakšen drug način odstranitve) dela plasti.

Težave

V uvodu zapisane trditve seveda držijo, vendar se pogosto pojavijo težave, zaradi katerih težko natančno odčitamo višino stopnice. Neredko je stopnica tako slabo izražena, da lahko podamo le grobo oceno o debelini plasti. Teh težav je več:

1. Neenakomerna debelina tanke plasti

Enakomernost debeline plasti je močno odvisna od tehnike nanosa, toda pogosto pride do večjih sprememb debeline na robovih vzorca ali kakršnih koli spremembah geometrije. Primerno mesto za merjenje debeline naj bo ravno, stran od robov in štrlečih delov, ki bi utegnili povzročati senčenje.

2. Neizrazita stopnica

Če maska ni primerno pričvrščena na podlago (spet so zahteve močno odvisne od tehnike nanosa), stopnica ni jasno izražena. Namesto ostrega skoka

med golo podlago in tanko plastjo dobimo zvezen prehod, kjer ni jasno, kje je prava debelina tanke plasti (slika 1a). Takšen pojav je pogost pri pripravi stopnice z jedkanjem.

3. Preveč izrazita stopnica

Pri nekaterih postopkih priprave stopnice (npr. sol gel) je velikost stopnice pretirana in je pravilno mesto za odčitek debeline tanke plasti stran od prehoda gola podlaga/tanka plast (slika 1b). Podobno je pri luščenju dela površine, kjer sicer dobimo zelo ostre stopnice, a utegne biti plast ob robovih nekoliko upognjena.

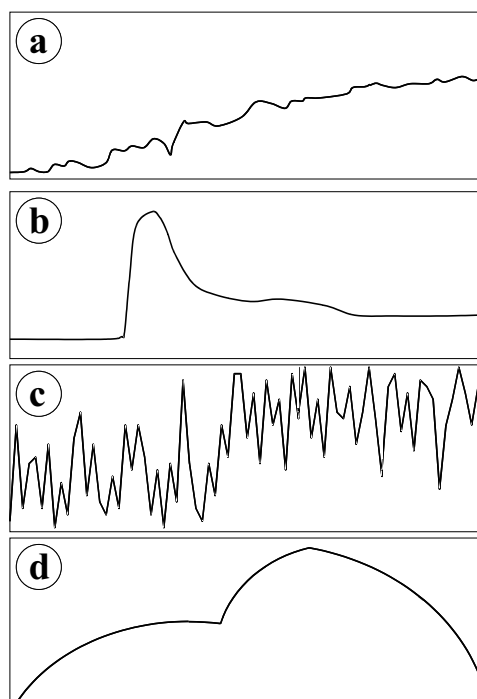
4. Hrapavost

Tako površina podlage kot tudi površina tanke plasti imata neko končno hrapavost. Ta lahko med nanosom ostane enaka, se poveča (npr. nanos s katodnim lokom) ali zmanjša (npr. breztokovni nanos). Hrapavost ni moteča, če je mnogo manjša od debeline plasti. Pri zelo tankih plasteh pa je hrapavost večkrat primerljiva z debelino plasti, zato je težko odčitati ničelno linijo podlage in višino stopnice (slika 1c).

5. Ukrivljenost vzorca

Vse prej našteje težave se da relativno enostavno obiti, če je podlaga (ničelna linija) ravna. Večinoma pa temu ni tako. Če sama podlaga ni popolnoma ravna, bodisi zaradi nenatančne izdelave ali kasnejše obdelave površine. Če je debelina tanke plasti 1 μm , bo ukrivljenost 1 μm na razdalji 10 mm (to je le 1:10.000) precej pokvarila meritev (slika 1d).

Toda bolj kot nepravilna oblika vzorca je pomembna ukrivljenost vzorca zaradi notranjih ali



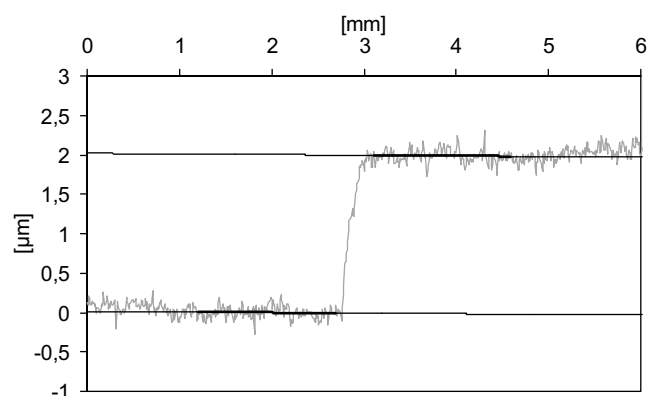
Slika 1: Značilne težave pri odčitavanju višine stopnice: a) neizrazita stopnica, b) preveč izrazita stopnica, c) prevelika hrapavost površine, d) prevelika ukrivljenost vzorca

termičnih napetosti. Testni vzorci so ponavadi tanki (silicijeve rezine, stekla, keramične ploščice itd.), tako da jih napetosti na fazni meji zlahka ukrivijo za nekaj mikrometrov. Posebej neugodno je, ker pride na meji gola podlaga/tanka plast do največjih pregibov, tako da izgubimo referenčno linijo.

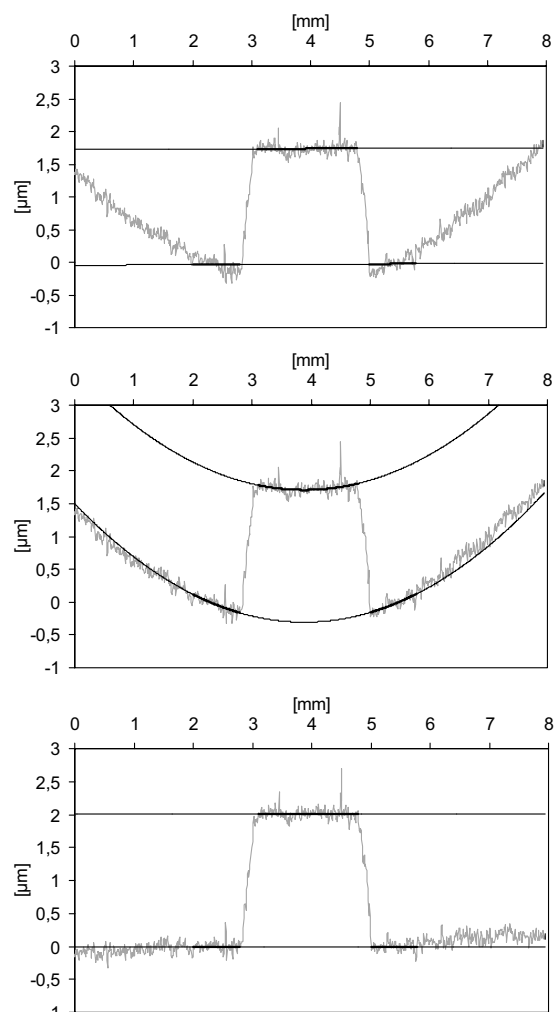
Seveda lahko več teh težav nastopi skupaj in v takih primerih, npr. neizrazita stopnica na močno hrapavi in ukrivljeni podlagi, debeline plasti ne moremo določiti.

Rešitve

Prej opisane težave lahko zreduciramo na naslednji problem:



Slika 2: Odčitavanje višine stopnice s prilagajanjem dveh vzporednih premic. Intervala, na katerih je bilo narejeno prilagajanje, sta odebeljena.

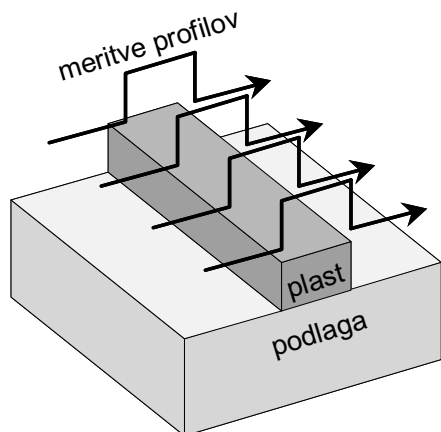


Slika 3: Analiza profila z dvema stopnicama: a) neustreznost linearnega prilagajanja, b) postopek kvadratnega prilagajanja, c) "poravnani" profil. Intervali, na katerih je bilo narejeno prilagajanje, so odebeljeni.

1. poiskati je treba del profila, kjer je gotovo gola podlaga
2. poiskati je treba del profila, kjer je gotovo tanka plast prave debeline
3. na obeh odsekih je treba potegniti vzporedni premici (ali kakšni drugi krivulji), ki se dobro prilegata merjenemu profilu
4. razlika med obema premicama oz. krivuljama je enaka iskani debelini.

Prvi dve nalogi rešimo na podlagi izkušenj - tu nam ne pomaga nobena matematika. Referenčni del profila naj bo čim bližje stopnici, vendar ne sme segati v prehodno območje. Prav tako se izognimo prevelikim artefaktom (veliki vrhovi zaradi prašnih delcev ipd.), ki nam pokvarijo natančnost izračuna.

Najpreprostejši način rešitve tretje točke je, da na natisnjenem profilu z ravnilom potegnemo dve premici: eno čez referenčni del gole podlage in drugo čez referenčni del tanke plasti (slika 2). Premici morata biti vzporedni. Razlika med premicama (razlika višin, ne razdalja med njima!) je enaka

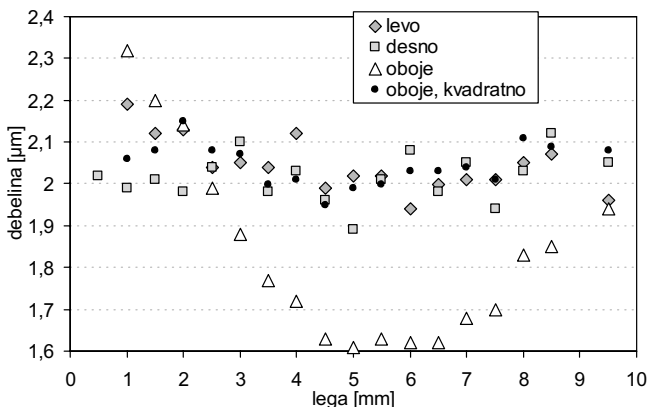


Slika 4: Skica vzorca, na katerem smo testirali zanesljivost meritev

debelini tanke plasti. Če sta ukrivljenost vzorca in hrapavost površine majhni, je tak način dovolj natančen kljub preprostosti.

Pogosto pa stopnica ni tako preprosta, da bi na roko določili debelino. Tedaj je treba profil posneti in debelino izračunati. Določiti moramo dve premici, eno potegnemo čez referenčno področje podlage ($y=kx+n_1$), drugo pa čez referenčno področje tanke plasti ($y=kx+n_2$). Obe referenčni področji morata biti približno enako dolgi. Kot rečeno, sta premici vzporedni, zato sta koeficienta k enaka. Določiti moramo torej tri parametre (k , n_1 in n_2), in sicer tako, da bo vsota kvadratov razlik med premico in merjenim profilom na obeh referenčnih področjih najmanjša. Debelina plasti je enaka $d=n_2-n_1$. V večini primerov linearno prilagajanje zadostuje in prilagajanje s krivuljami višjega reda ne izboljša natančnosti.

Pri močno ukrivljenih vzorcih pa je koristno, da masko pripravimo tako, da nastane tanka plast le na področju pasu preko vzorca, na obeh straneh pa je gola podlaga. Lahko naredimo tudi obratno, da je s tanko plastjo prekrit ves vzorec razen pasu na sredini, ki ostane gol. Na profilu torej dobimo dve stopnici, na katerih določimo tri referenčna področja: gola podlaga levo, tanka plast v sredini in gola podlaga desno. Če je vzorec ukrivljen, referenčni področja podlage na bosta



Slika 5: Meritve debeline konkretnega vzorca, izračunane z različnimi metodami prilagajanja

vzporedni, zato bomo pri linearnem prilagajanju dobili napačen rezultat (slika 3a). Treba je uporabiti kvadratno prilagajanje, kar ima tudi ustrezno fizikalno ozadje. Po Stoneyjevi formuli je namreč vzorec pod vplivom notranjih napetosti ukrivljen v obliki parabole.

Modeliranje poteka podobno kot pri linearnem prilagajanju. Potegnemo dve paraboli (slika 3b): prva gre čez obe referenčni področji gole podlage ($y=ax^2+bx+c_1$), druga pa čez referenčno področje plasti ($y=ax^2+bx+c_2$). Ker sta paraboli vzporedni, sta kvadratna člena (a) in linearna člena (b) enaka. Tokrat imamo štiri proste parametre (a , b , c_1 in c_2), debelina pa je enaka razliki prostih členov. Poenostavljeno lahko povemo, da na ta način "poravnamo" celoten vzorec, ne da bi popačili stopnice (slika 3c). Takšen način dela nam da bolj zanesljiv rezultat.

Zanesljivost

Poglejmo si konkreten primer vzorca (podlaga iz polirane keramike 1 cm × 1 cm), na katerega je bil nanesen pas tanke plasti AlCuFe. V prečni smeri smo v razmaku 0,5 mm izmerili profile (slika 4). Na vsakem profilu smo izmerili višino leve stopnice in ločeno desne stopnice z linearnim prilagajanjem (slika 2). Posebej pa smo na obeh stopnicah skupaj naredili še analizo s kvadratnim prilagajanjem (slika 3b) in za primerjavo še z linearnim prilagajanjem (slika 3a).

Na sliki 5 so prikazane debeline, izračunane na štiri različne načine za vsak profil posebej. Na abscisi je vzdolžna smer pasu, na katerem je bila nanosena tanka plast. Takoj lahko opazimo, da je analiza z linearnim prilagajanjem obeh stopnic skupaj obremenjena z veliko sistematično napako in zato neprimerna. Linearno prilagajanje na eni stopnici (levi ali desni) nam da zadovoljivo ponovljiv rezultat – sipanje je $\pm 0,1 \mu\text{m}$, kar ob debelini $2 \mu\text{m}$ prinese natančnost v okviru 5 %. Takšno natančnost torej lahko pričakujemo tedaj, ko imamo na razpolago le eno stopnico. S kvadratnim prilagajanjem obeh stopnic skupaj pa je sipanje manjše, še vedno pa je znatno ob robovih vzorca. Meritev na sredini vzorca in naknadna analiza torej dosežeta natančnost $\pm 0,04 \mu\text{m}$ oz. 2 %.

Sklep

V izjemnih primerih predstavlja merjenje debeline tanke plasti s profilometrom le odčitek na izpisu. Ponavadi pa je zaradi hrapavosti, ukrivljenosti in neenakomerne stopnice potrebno prilagajanje profila s premicami. Večkrat pa niti to ne zadostuje in je potrebno kvadratno prilagajanje na profilu z dvema stopnicama. To nam pri izrazitejših profilih zagotavlja veliko natančnost, pri neizrazitih pa je edina možnost za dosego uporabnega rezultata.

Literatura

¹M. Čekada, *Vakuumist* **20**(1) (2000) 16–19

DRUŠTVENE NOVICE

DESETI MEDNARODNI ZNANSTVENI SESTANEK VAKUUMSKA ZNANOST IN TEHNIKA

Dne 22. maja letos smo se na Brdu pri Kranju v prijetnem okolju prenovljenega hotela Kokra srečali člani Hrvatskega vakuumskega društva (HVD) in Društva za vakuumsko tehniko Slovenije (DVTS). To je bilo že jubilejno, deseto srečanje. Serijo srečanj smo začeli po razpadu zveze JUVAK leta 1992. Prvo srečanje je bilo 21. aprila leta 1993 v Zagrebu. Pregled vseh dosedanjih srečanj je podan na koncu tega prispevka.

Srečanja prirejamo v obliki znanstvenega sestanka, kjer predstavimo svoje delo na področju vakuumske znanosti in tehnike. Veseli me, da se zanimanje za udeležbo z obeh strani z leti ni zmanjšalo in da smo letos zbrali kar 34 prispevkov. Vseh registriranih udeležencev je bilo 51. Moram reči, da je bila teden dni po poteku roka za prijavo povzetka situacija mnogo slabša. Prejeli smo le 7 povzetrov in pomislili smo že, da bi srečanje odpovedali. Vendar se je stanje hitro izboljšalo po dodatnem opominu organizacijskega odbora potencialnim udeležencem z obeh strani.

Če bi hoteli vseh 34 prispevkov predstaviti s predavanji, bi sedeli pozno v noč. To pa ni poglobitveni namen naših srečanj. Mnogo pomembnejše je, da se поблиže spoznamo in vzpostavimo osebne stike med skupinami, ki se ukvarjajo s podobno tematiko. Upam, da bodo ti osebni stiki pripeljali tudi do bilateralnih raziskovanih projektov in skupne udeležbe pri evropskih projektih.

Na srečo je večina udeležencev izrazila željo, da predstavi svoje delo v obliki postra, tako da smo lahko

program brez težav razdelili v dva dela, govorno sekcijo in postersko sekcijo. V času pred kosilom smo imeli devet predavanj, od tega dve vabljene predavanji. Vabljena predavateljica sta bila Marko Kralj z Inštituta za fiziko iz Zagreba in Miha Čekada z Inštituta "Jožef Stefan". Oba sta pred kratkim doktorirala in sta nam v zelo zanimivih in odlično pripravljenih predavanjih predstavila svoje delo.

Po kosilu smo se sprehodili po parku Brdo vse do Račjega otoka. Vsi smo uživali v prekrasnem sončnem vremenu, a smo se vseeno vrnili v predavalnico, kjer smo si na posterski sekciji ogledali še preostalih 24 prispevkov.

Ob konca srečanja smo nazdravili na spletene prijateljske vezi v preteklih desetih letih in si zaželeli uspešno sodelovanje še naprej.

Kronika mednarodnih znanstvenih sestankov med HVD in DVTS

1.	Zagreb, 21. 4. 1993
2.	Ljubljana, maj 1994 (IMT)
3.	Bled, 4. - 7. 4. 1995 (skupaj z JVC-6)
4.	Zagreb, 18. 4. 1996
5.	Zagreb, 20. 5. 1998
6.	Ljubljana, 17. 6. 1999 (Kemijski inštitut)
7.	Pula, 4. - 9. 6. 2000 (skupaj z JVC-8)
8.	Brdo, 23. 5. 2001
9.	Trakoščan, 15. 5. 2002
10.	Brdo, 22. 5. 2003

dr. Janez Šetina



SEJA MEDNARODNE ZVEZE IUUSTA (INTERNATIONAL UNION FOR VACUUM SCIENCE, TECHNIQUE AND APPLICATIONS) V DUBROVNIKU

Triindevetdeseta seja izvršnega odbora IUUSTA (93rd executive council of the IUUSTA, ECM-93) je potekala v Dubrovniku od petka, 19. septembra do vključno nedelje, 21. septembra 2003. Iz Slovenskega društva (DVTS) sva se je udeležila dr. Janez Šetina in mag. Andrej Pregelj. Sestanke smo imeli v prostorih hotela President na Lapadu. Domače društvo – gostitelj – je za udeležence pripravilo tudi ogled lepega starega mesta in se potrudilo, da smo prosti čas prijetno preživeli.

Prva dva dneva so potekali sestanki tehničnih (vakuumska znanost, nanotehnologije, plazma, znanost o površinah, metalurgija) in administrativnih odborov (financiranje zveze, dolgoročno načrtovanje aktivnosti, priprava kongresov, konferenc in znanstvenih delavnic, izobraževanje, publikacije, nagrade itd.). Podana so bila poročila o izvedenih aktivnostih (po prenosu uredništva domače strani Zveze iz ZDA v Francijo nova ekipa to že kar dobro obvladuje, priprave za Mednarodni vakuumski kongres IVC-16 poleti 2004 potekajo v Italiji, v povezavi z njim bo v Benetkah izveden tudi občni zbor Zveze itd.). Pomemben sestanek je bilo zasedanje znanstveno-tehničnega odbora (STD, scientific technical directory), ki vključuje vseh devet strokovnih področij Zveze in tozadevne organizacijsko administrativne posle. Potekal je v soboto dopoldne in poleg stroke obravnaval še izobraževanje, sponzorstva Zveze za izvedbo raznih konferenc, šol in delavnic, nagrade in štipendije (ki jih podeljuje Zveza), priprave na IVC-16 ter drugo.

Glavno, sejo (ECM-93) je v nedeljo popoldne odprla predsednica Zveze Francozinja dr. M-G. Barthés-Labrousse in posebej pozdravila zastopnike Hrvaškega društva kot gostitelja. Prisotnih je bilo okrog 40 članov različnih društev, od tega 19 delegatov; prispelo je tudi 17 poverilnic za glasovanje od tistih delegatov, ki jim ni uspelo priti. Po predstavljanju delegatov držav sta svoji poročili o delovanju zveze v preteklem obdobju podala predsednica Barthesova in sekretar Westwood. Finančno poročilo

je podal blagajnik Švicar g. Wahl. Sledil je dr. Sancrotti s poročilom o delu STD in zastopniki sekcij (Applied surface science, Electronic materials+processing, Nanometer structures, Plasma science+technique, Surface science, Thin films, Vacuum metallurgy, Vacuum science) s svojimi poročili; tu je treba omeniti spremembo imena sekcije "Vacuum metallurgy" v "Surface engineering" in še ne popolnoma rešeno sodelovanje sekcije "Nanotechnology" na IVC-16. Poročila komitejev so obravnavala: šolnine, izobraževanje, publiciranje. Posebej obširno je bilo poročilo o pripravah na IVC-16 junija 2004 v Benetkah. Tam bosta potekali tudi 95. in 96. seja IO (tj. ECM-95 in -96) in tudi 15. skupščina (general meeting GM15, 30. 6. 2004) Zveze, ki ji praviloma prisostvujejo tričlanske delegacije vseh vključenih društev. V dneh tik pred IVC-16 (poleti 2004 v Benetkah) bo v Sloveniji v okviru našega društva (DVTS) organizirana znanstvena delavnica s področja "Vacuum science". Zveza IUUSTA jo bo kot podobne druge sofinancirala z 10.000 SFr. Kot je že bilo sklenjeno, bo za Benetkami gostil IVC-17 leta 2007 Stockholm, organizatorja IVC-18 leta 2010 pa bomo izbirali na naslednji seji IUUSTA februarja 2004 v Lyonu (ECM-94).

Pod točko razno se je zvrstila naslednja tematika:

- posodobljanje učnega gradiva (visual aids) poteka razmeroma počasi, a vztrajno
- ponovno izdajo knjižice o zgodovini IUUSTA in njenih članic še vedno pripravlja prof. Robins iz Avstralije
- kratko predstavitev zgodovine in dejavnosti Hrvaškega društva je podal dr. M. Milun.

Na koncu se je predsednica v imenu vodstva IUUSTA zahvalila domačemu Hrvaškemu vakuumskemu društvu za gostoljubnost in organizacijo prijetnega tridnevnega delovnega srečanja Zveze ter vsem prisotnim za sodelovanje.

mag. Andrej Pregelj

NOVA KNJIGA

Stanislav Južnič, Avguštin Hallerstein, kitajski astronom iz Mengša

Pred kratkim je pri Tehniški založbi Slovenije izšla knjiga o Avguštinu Hallersteinu, ki jo je napisal dolgoletni sodelavec Vakuumista dr. Stanislav Južnič. Njegov zapis o Ferdinandu Hallersteinu je objavljen tudi v tej številki Vakuumista. Knjiga, ki je napisana v lepem in sočnem jeziku, je prvi dokument o delu tega raziskovalca in jezuita. V knjigi dr. Južniča, ki se raziskovalno ukvarja s fiziko kranjskih jezuitov v 18. stoletju, je opisano delo najpomembnejšega kranjskega astronoma Avguština Hallersteina in znanstvene spodbude, ki jih je dobil v domačem kranjskem okolju. Opisani so njegovi astronomski in drugi znanstveni prispevki. Ferdinand Avguštin Hallerstein je bil sin barona Janeza Ferdinanda, gospodarja Ravbarjevega gradu v Mengšu in matere baronice Marije Suzane Elizabete Erberg iz rodu Kočvarjev, ki so se že preselili v Dol. Ob njegovi 300-letnici rojstva predstavljamo podrobnejši pregled njegovega življenja in dela.

Leta 1921 je Avguštin vstopil k jezuitom na Dunaju. 1739 se je izkrcal na Kitajskem in tam ostal do smrti. Decembra 1743 je bil imenovan za prisednika matematičnega in astronomskega kolegija cesarskega dvora v Pekingu ter mandarina šeste stopnje. Leta 1745 je postal provincial in vizitator japonske jezuitske province. Napredoval je v predsednika astronomsko-matematičnega kolegija in mandarina pete, pozneje tretje stopnje. Nadrejen mu je bil le mandžurski princ.

Zaradi Hallersteinovega visokega položaja v Pekingu so njegova pisma objavljali in komentirali v Londonu, Sankt Petersburgu, Parizu, Berlinu, Leipzigu in na Dunaju. Izdelal je zemljevide delov kitajskega cesarstva. Objavil je dotlej najbolj natančno oceno števila in natalitete Kitajcev. Sodeloval je pri prvih elektrostatičnih in vakuumskih poskusih v Pekingu. Evropejcem je približal navade, pokrajino, rastlinski in živalski svet Kitajske in sosednjih dežel. S sodelavci je opazoval severni sij, komete, mrke, gibanja planetov in satelitov. Razvil je nov postopek za izračunavanje najmanjše razdalje med dvema astronomskima objektoma, merjene z izpopolnjenim mikrometrom. Organiziral je astronomske meritve v različnih krajih obsežnega cesarstva.

Čeprav je Kranjsko zapustil v mladih letih, je sorodnikom pogosto pisal vse do poslednjih dni. Prištevamo ga k najpomembnejšim kranjskim znanstvenikom.

S knjigo želi avtor prispevati k boljšemu poznanju tega pomembnega kranjskega znanstvenika tudi na Slovenskem. Za odlično opravljeno delo gre dr. Južniču vse priznanje. Tehnični založbi Slovenije čestitamo, ker se je odločila za tisk te knjige, čeprav je tržno manj zanimiva. Zahvala gre tudi Društvu za vakuumsko tehniko Slovenije in Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije, ki sta finančno podprla izdajo te knjige.

dr. Peter Panjan

scan

in
PFEIFFER VACUUM

VSE ZA VAKUUM

tel.: 04-27 50 200

fax.: 04-27 50 240

www.scan.si

scan@siol.net

www.pfeiffer-vacuum.de





TurboCube

The modular pumping station will fit
your application



- ▶ Easy adaptation to your vacuum process
- ▶ No additional control necessary
- ▶ Integration in Profibus control

PFEIFFER  **VACUUM**

Pfeiffer Vacuum Austria GmbH

Phone +43 (0) 1 8941 704 · Fax +43 (0) 1 8941 707 · office@pfeiffer-vacuum.at · www.pfeiffer-vacuum.net

SCAN d.o.o. Slovenija

Phone: +386 (0) 4-27 50 200 · Fax +386 (0) 4-27 50 240 · scan@siol.net · www.scan.si

www.pfeiffer-vacuum.net