
Naslovnica

NAVODILA AVTORJEM PRI PRIPRAVI PRISPEVKOV

Tematsko Vakuumist obsega širše področje vakuumskih znanosti in tehnologij, fiziko in kemijo tankih plasti in površin, analitiko površin, fiziko plazme, vakuumsko metalurgijo ter zgodovino vakuumske znanosti. Vsebinsko objavljamo štiri skupine prispevkov:

- **znanstveni članki** o aktualnih raziskavah s področja vakuumske znanosti in sorodnih področij;
- **strokovni članki**, kot so predstavitev novosti v svetu, zgoščen pregled nekega področja, primeri uvajanja tehnologij v prakso ipd.;
- **praktični nasveti** reševanja konkretnih vakuumskih problemov v laboratoriju;
- **kratke novice** o društvenem dogajanju, organizaciji konferenc, predstavitve knjig ipd.

Znanstveni in strokovni prispevki so recenzirani. Če je članek sprejet (po recenzentovem in lektorjevem pregledu), avtor vrne popravljen članek uredniku Vakuumista. Prispevki morajo biti napisani v slovenskem jeziku.

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

VSEBINA ROKOPISA

Rokopis naj bo sestavljen iz naslednjih delov:

1. naslov članka (v slovenskem in angleškem jeziku)
 2. podatki o avtorjih (ime in priimek, institucija, naslov institucije)
 3. povzetek (v slovenskem in angleškem jeziku, 100–200 besed)
 4. ključne besede (v slovenskem in angleškem jeziku, 3–6 besed)
 5. besedilo članka v skladu s shemo IMRAD (uvod, eksperimentalne metode, rezultati in diskusija, sklepi)
 6. seznam literature
 7. morebitne tabele z nadnapisi
 8. podnapisi k slikam
 9. slike (risbe, fotografije), ki naj bodo priložene posebej
- Praktični nasveti in kratke novice so brez povzetka, ključnih besed in literature, vsebinska zasnova besedila pa ni strogo določena.

TEHNIČNE ZAHTEVE ZA ROKOPIS

- Tekst naj bo shranjen v formatu doc, docx ali rtf. Formata tex ali pdf za tekst nista primerna.
- V dokumentu naj bo čim manj avtomatskih indeksov, križnih povezav (linkov) in stilističnih posebnosti (različni font, formati, poravnave, deljenje besed). Pri oblikovanju se omejite na kaze **mastno**, *poševno*, ^{potenca} ^{indeks} in posebni znaki. Formule oblikujte bodisi tekstovno ali z urejevalnikom (npr. equation editor), lahko pa jih vključite v tekst kot slikovni objekt.
- Tekst naj bo smiselno razdeljen na poglavja in podpoglavja (detajlnejša delitev ni zelena), naslovi pa naj bodo oštevilčeni z vrstilci, npr. »2.1 Meritve tlaka«.

- Na vse literaturne vire, tabele in slike morajo biti sklici v tekstu. Vrstni red literaturnih virov, tabel in slik naj sledi vrstnemu redu prvega sklica nanje.
- Primeri sklicevanja: na literaturne vire [1], na enačbe (1), na tabele tabela 1, na slike slika 1. Vse samostojno stoječe enačbe naj bodo ob robu označene, npr. (1). Če je slika iz več delov, naj bodo posamezni deli označeni s črkami: a), b), c), č) itd., in sicer tako na sliki kot na podnapisu.
- Literaturni viri morajo biti popolni (brez okrajšav et al., ibid ...). Izogibajte se težko dostopnih virov (prospekti, seminarske naloge, neobjavljene raziskave, osebna korespondenca). Primeri pravilnih zapisov:
 - monografija: S. Južnič, Zgodovina raziskovanja vakuuma in vakuumskih tehnik, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Ljubljana, 2004, str. 203
 - članek v periodični publikaciji: M. Finšgar, I. Milošev, *Vakuumist*, 29 (2009) 4, 4–8
 - prispevek v zbornikih posvetovanj: Novejši razvoj trdih zaščitnih PVD-prevlek za zaščito orodij in strojnih delov, Zbornik posvetovanja Orodjarstvo, Portorož, 2003, 121–124
 - dostopno na svetovnem spletu: UK ESCA Users Group Database of Auger parameters, <http://www.uksaf.org/data/table.html>, zadnjič dostopano: 11. 2. 2010
- Tabele naj bodo oblikovno enostavne. V rokopisu naj stojijo na koncu dokumenta. Za ločevanje stolpcev uporabljajte tabulatorje (ne presledkov) ali tabelarično formo urejevalnika.
- Slike naj bodo shranjene posebej v navadnih formatih (tif, png, jpg), lahko tudi združeni v en dokument (pdf, ppt). Slik ne vstavljajte v tekstualni del rokopisa! Poskrbite za ustrezno resolucijo, še posebej pri linijskih slikah. Slike naj bodo črno-bele ali v sivih tonih, ne barvne.
- Črkovne oznake na slikah naj bodo take velikosti, da je po pomanjšavi na širino enega stolpca (7,9 cm) velikost znakov najmanj 1,2 mm. Priporočljiv je oblikovno enostaven font, npr. Arial.
- Pri pisanju veličin in enot se držite načel standarda ISO-31 (veličine pišemo poševno, enote pokončno, isto pravilo velja tudi za grške črke). Osi grafov in vodilne vrstice tabel pišemo v obliki *veličina*/enota, npr. *m/kg*.

UREDNIŠTVO

Rokopise pošljite na naslov miha.cekada@ijs.si. Kontaktni podatki uredništva so:
doc. dr. Miha Čekada
glavni in odgovorni urednik Vakuumista
Institut »Jožef Stefan«
Jamova 39
1000 Ljubljana
e-pošta: miha.cekada@ijs.si
tel.: (01) 477 38 29
faks: (01) 251 93 85

VAKUUMIST 33/4, december 2013

VSEBINA

ČLANKI

Serijska in skupna Weibullova porazdelitev trdnosti keramičnih materialov Maša Gomilšek, Milan Ambrožič, Lovro Gorjan	4
Mikrostrukturne nepravilnosti trdih PVD-prevlek Peter Gselman, Peter Panjan	11
Prvi Teslovi stiki z vakuumskimi tehnikami (ob 70-letnici smrti), 3. del Stanislav Južnič	22

DRUŠTVENE NOVICE

Pregled konferenc v letu 2014	34
Sporočilo za javnost – Sistema za zajem helija	35

VAKUUMIST

Časopis za vakuumsko znanost, tehniko in tehnologije, vakuumsko metalurgijo, tanke plasti, površine in fiziko plazme

Izid publikacije je finančno podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz naslova razpisa za sofinanciranje domačih znanstvenih periodičnih publikacij

Glavni in odgovorni urednik: doc. dr. Miha Čekada

Uredniški odbor: dr. Matjaž Finšgar, dr. Jože Gasperič, prof. dr. Monika Jenko, dr. Stanislav Južnič, doc. dr. Marta Klanjšek Gunde, doc. dr. Janez Kovač, prof. dr. Urška Lavrenčič Štangar, dr. Peter Panjan, mag. Andrej Pregelj, dr. Drago Resnik, doc. dr. Alenka Vesel, prof. dr. Franc Zupanič

Tehnični urednik: Miro Pečar

Lektor: dr. Jože Gasperič

Korektor: dr. Matjaž Finšgar

Oblikovanje naslovnice: Ignac Kofol

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

Naklada: 350 izvodov

Vakuumist on-line: <http://www.dvts.si/arhiv>

Letna naročnina: 25 EUR

ISSN 0351-9716

UDK 533.5.62:539.2:669-982

Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije

Teslova 30
1000 Ljubljana

Tel. (01) 477 66 00

E-pošta: info@dvts.si

Domača stran društva: <http://www.dvts.si>

Številka transakcijskega računa pri NLB: 02083-0014712647

Uredništvo Vakuumista

doc. dr. Miha Čekada

glavni in odgovorni urednik Vakuumista

Institut »Jožef Stefan«

Jamova 39
1000 Ljubljana

e-pošta: miha.cekada@ijs.si

tel.: (01) 477 38 29

faks.: (01) 251 93 85

SERIJSKA IN SKUPNA WEIBULLOVA PORAZDELITEV TRDNOSTI KERAMIČNIH MATERIALOV

¹Maša Gomilšek, ¹Milan Ambrožič, ²Lovro Gorjan

STROKOVNI ČLANEK

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Koroška 160, 2000 Maribor

²Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Izmerjene upogibne trdnosti keramičnih vzorcev se navadno zelo dobro ujemajo z Weibullovo porazdelitveno funkcijo. Pri vsaki seriji v industrijski proizvodnji keramičnih izdelkov se vzame majhno število preizkusnih vzorcev pravilne geometrijske oblike in se jih zlomi pri tri- ali štiritočkovnem upogibnem preizkusu. Zato se v več letih proizvodnje keramičnih izdelkov in meritev trdnosti vzorcev nabere veliko število podatkov, tako da lahko na njihovi osnovi zanesljivo potrdimo veljavnost Weibullove porazdelitve. Nastane pa vprašanje, koliko se parametri porazdelitve za posamezne serije razlikujejo od parametrov za celotno večletno porazdelitev (tudi potem, ko upoštevamo sistematično napako pri oceni parametrov za majhno število vzorcev pri različnih metodah). Problem je namreč v tem, da so razmere pri izdelavi od serije do serije vsakič malo drugačni (temperatura, vlaga, človeški dejavnik itd.).

Ključne besede: Weibullova porazdelitev, upogibna trdnost, linearna regresija, metoda največje verjetnosti, metoda momentov

Serial and total Weibull strength distribution of ceramic materials

ABSTRACT

Measured values of the bend strength of ceramic samples usually agree very well with the Weibull distribution function. For each series of industrial production a small number of testing samples with regular shape are broken in the three- or four-point bending test. Therefore, in several years of manufacturing ceramic products and strength measurements a large amount of data is gathered, and on their basis we can reliably confirm the validity of the Weibull distribution. A question appears, of how the parameters of the strength distribution for individual series differ from the corresponding parameters for the entire distribution over several years (after the systematic bias in the evaluation of the parameters for small number of samples according to different methods has been considered). There is a problem that the fabrication conditions vary from series to series (temperature, humidity, human factor, etc.).

Keywords: Weibull distribution, bend strength, linear regression, maximum likelihood method, moments method

1 UVOD

Weibullova porazdelitev je znana že od sredine prejšnjega stoletja in temelji na principu »najšibkejšega člana«, to je, material oz. izdelek se zlomi, ko popusti njegov najšibkejši del [1]. Povedano drugače: ko lokalna mehanska napetost preseže trdnost materiala, nastane tam razpoka, ki se hitro razširi in povzroči zlom celotnega vzorca ali izdelka. Izmerjene trdnosti keramičnih vzorcev pri tri- ali štiritočkovnem upogibnem preizkusu se navadno zelo dobro ujemajo z Weibullovo porazdelitveno funkcijo. Zanesljivost in uporabnost te porazdelitve je bila preverjena za zelo

širok razpon eksperimentalnih razmer in podprta s teoretičnimi raziskavami [2–10].

V prejšnjem prispevku smo opisali statistično obdelavo 5100 vrednosti meritev upogibnih trdnosti keramičnih vzorcev iz korundne keramike (Al_2O_3) v podjetju Hidria AET, d. o. o. [11]. Za oceno obeh Weibullovih parametrov iz omejenega vzorca meritev smo uporabili metodo maksimalne verjetnosti. S primerjavo korelacijskega koeficienta ali faktorja R^2 na osnovi verjetnostnih diagramov $Q - Q$ za štiri različne statistične porazdelitve smo ugotovili, da se meritve najboljše ujemajo ravno z Weibullovo porazdelitvijo.

V tem članku se bomo torej ukvarjali samo z Weibullovo porazdelitvijo, za primerjavo pa bomo poleg metode maksimalne verjetnosti uporabljali tudi linearno regresijo in metodo momentov [5]. Z njimi ocenimo vrednosti obeh parametrov Weibullove porazdelitve. Zanimala nas bo predvsem korelacija med dobljenimi parametri pri vseh treh metodah, še bolj pa zveza med parametri za majhno in veliko število serij vzorcev.

Ena od zanimivih možnosti pri uporabi eksperimentalnih trdnosti, ki so jo raziskovalci večkrat uporabili, je naključno mešanje vrstnega reda teh podatkov in ugotavljanje parametrov porazdelitve naključnih vzorčnih skupin [3, 8]. Za takšno sistematično mešanje velike množice podatkov lahko uporabimo računalnikov generator naključnih števil. Tako lahko preverjamo zanesljivost statističnih napovedi na osnovi manjših preizkusnih grup. V tem prispevku bomo primerjali predvsem Weibullov modul v primeru preizkusnih skupin podatkov, kot so bili dobljeni po vrstnem redu v podjetju, z Weibullovim modulom na osnovi mešanja eksperimentalnih podatkov.

2 STATISTIČNI MODEL

Eksperimentalne parametre pri lomljenju vzorcev iz aluminijevega oksida (Al_2O_3) smo že opisali v eni od prejšnjih števil Vakuumista [11], zato opisujemo tu le statistično obdelavo meritev trdnosti. Naša statistična (naključna) spremenljivka je 4-točkovna upogibna trdnost (na kratko trdnost), σ . V računih uporabimo obe porazdelitveni funkciji: verjetnostno gostoto $p(\sigma)$ in kumulativno verjetnostno funkcijo:

$$P(\sigma) = \int_0^{\sigma} p(x) dx$$

Pri dvoparametrični Weibullovi porazdelitvi sta obe verjetnostni funkciji p in P :

$$p(\sigma) = \frac{m}{\sigma_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{m-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

z Weibullovim modulom m in karakterističnim parametrom σ_0 .

Najznačilnejša statistična parametra vsake teoretične in eksperimentalne porazdelitve sta pričakovana vrednost naključne spremenljivke (pri eksperimentalni porazdelitvi je to povprečna vrednost) in njena standardna deviacija. Zapišimo povprečno trdnost $\langle \sigma \rangle$ in njeno standardno deviacijo $\delta \sigma$ na osnovi eksperimentalnih podatkov in teoretične Weibullove porazdelitve:

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \sigma_i = \sigma_0 \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \delta \sigma &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (\sigma_i - \langle \sigma \rangle)^2} = \\ &= \sigma_0 \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \end{aligned} \quad (4)$$

Pri tem N pomeni število zlomljenih vzorcev pri upogibnem preizkusu, σ_i pa je i -ta trdnost po vrsti. Simbol Γ označuje funkcijo gama, definirano takole:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (5)$$

3 METODE ZA OCENO PARAMETROV WEIBULLOVE PORAZDELITVE

Naredimo kratek povzetek bistva uporabljenih metod za izračun Weibullovih parametrov.

Pri linearni regresiji (LR) uporabljamo različne preproste funkcije (v angleški literaturi se je za takšno funkcijo uveljavilo ime *rank estimator*), zato da vrstnemu redu izmerjene trdnosti (če jih razvrstimo po velikosti od najmanjše do največje) priredimo kumulativno verjetnost P . Omenimo štiri takšne pogosto uporabljane funkcije [5]:

$$P_i = \frac{i-1/2}{N} \quad (6a)$$

$$P_i = \frac{i}{N+1} \quad (6b)$$

$$P_i = \frac{i-3/10}{N+4/10} \quad (6c)$$

$$P_i = \frac{i-3/8}{N+1/4} \quad (6\check{c})$$

Pri tem je i indeks, ki ustreza eksperimentalni vrednosti trdnosti σ_i , N pa je število zlomljenih vzorcev. Pare (σ_i, P_i) potem pri metodi LR primerjamo s funkcijo (2), pri kateri ocenimo parametra m in σ_0 , da se pari funkciji najbolj prilegajo. Če enačbo (2) preuredimo v primerno linearizirano obliko (od tod metodi ime), je problem iskanja obeh parametrov analitično rešljiv in preprost. Zato je metoda LR tako uporabna, čeprav pri majhnem številu vzorcev N vodi do sistemske napake, predvsem pri oceni parametra m (metoda daje v povprečju premajhne vrednosti parametra).

Pri metodi največje verjetnosti (ML = maximum likelihood) uporabljamo porazdelitveno funkcijo (1). V tem primeru ni treba sortirati eksperimentalnih podatkov. Za vsako eksperimentalno vrednost trdnosti σ_i izrazimo po enačbi (1) vrednost p_i in potem tvorimo produkt vrednosti p_i za vse vzorce. Parametra m in σ_0 variiramo tako, da ima ta produkt maksimalno vrednost. Ustrezno rešitev poiščemo numerično z iterativno metodo.

Metoda momentov (MM) je v bistvu najpreprostejša. Weibullova parametra izračunamo tako, da se eksperimentalni in teoretični vrednosti za povprečno trdnost in njeno standardno deviacijo na osnovi enačb (3) in (4) ujemata.

Pri zelo velikem številu meritev pa lahko neposredno uporabimo tudi histogramsko (H) metodo. Kot pri metodi LR izmerjene trdnosti najprej sortiramo, interval vseh vrednosti razdelimo na majhne »predalčke« enakih širin in preštejemo število meritev v vsakem predalčku. S takšnim histogramom simuliramo porazdelitveno funkcijo (1). S prilagajanjem Weibullovih parametrov dobimo najboljše ujemanje med funkcijo (1) in eksperimentalno dobljenim histogramom.

Ko sta parametra Weibullove porazdelitve izračunana po kateri koli od teh metod, lahko kasneje izračunamo še korelacijski faktor R^2 , ki nam poda kvantitativno ujemanje med teorijo in eksperimentom:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \sigma_{i,th})^2}{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \langle \sigma_i \rangle)^2} \quad (7)$$

kjer $\langle \sigma_i \rangle$ pomeni povprečno vrednost izmerjenih trdnosti. Vsaki eksperimentalni vrednosti trdnosti σ_i v enačbi (7) ustreza teoretična trdnost $\sigma_{i,th}$ na osnovi teoretičnih Weibullovih parametrov. Vendar pa moramo za izračun vsake vrednosti $\sigma_{i,th}$ uporabiti eno od funkcij (6), ne glede na to, po kateri metodi smo prej izračunali parametra m in σ_0 . Na primer, pri izračunu obeh parametrov po metodah ML, MM in H sploh ne potrebujemo funkcij (6), pri izračunu R^2 po enačbi (7)

pa uporabimo eno od njih. Pri dobrem ujemanju teorije in eksperimenta je korelacijski faktor zelo blizu vrednosti 1.

Če imamo veliko preizkusnih skupin, kjer ima vsaka enako število vzorcev, izračunamo oba Weibullova parametra za vsako skupino posebej. Potem izračunamo povprečno vrednost parametrov, npr. $\langle m \rangle$ za Weibullov modul. Poskusi in simulacije Monte Carlo (MC) pa kažejo na to, da je porazdelitev vrednosti obeh parametrov pri velikem številu skupin največkrat log-normalna in ne Gaussova. To je najbolj očitno pri majhnih velikostih skupin, npr. $N = 12$. Zato je včasih morda smiselno logaritemsko povprečenje Weibullovih parametrov namesto direktnega povprečenja, ker je logaritemsko povprečje večkrat bližje pravi vrednosti parametrov za zelo veliko število vzorcev. Vzemi mo na primer logaritemsko povprečni Weibullov modul $\langle m_{LN} \rangle$. Za vsako preizkusno skupino izračunamo naravni logaritem Weibullovega modula, te logaritme povprečimo in nazadnje spet antilogaritmiramo. Za primerjavo zapišimo obe povprečni vrednosti Weibullovega modula:

$$\langle m \rangle = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K m_i \quad (8a)$$

$$\langle m_{LN} \rangle = \exp\left(\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \ln m_i\right) \quad (8b)$$

kjer K pomeni število preizkusnih skupin, m_i pa je Weibullov modul za i -to skupino. Seveda pa ostane posebno pri nepredvidljivi statistiki eksperimentalnih podatkov vprašanje, katero povprečenje nam daje vrednosti bližje vrednosti za celotno zbirko podatkov, $\langle m \rangle$ ali $\langle m_{LN} \rangle$.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Statistika za celoten nabor podatkov

V podjetju Hidria AET, d. o. o., so pri vsaki proizvodni seriji izdelkov iz korundne keramike zlomili po 12 preizkusnih vzorcev v obliki kvadra in izračunali njihove upogibne trdnosti. Najprej smo izračunali Weibullova parametra na osnovi vseh 5100 eksperimentalnih trdnosti, to je 425 proizvodnih ciklov po 12 preizkusnih vzorcev za zlom. Povprečna trdnost (aritmetična sredina vseh 5100 vrednosti) je bila $\langle \sigma \rangle = 289,56$ MPa, standardna deviacija pa $\delta\sigma = 37,48$ MPa.

Primerjali smo rezultate in zanesljivost vseh štirih prej omenjenih metod: LR, ML, MM in H. Že samo pri metodi LR imamo več možnosti: poskusili smo z vsemi štirimi funkcijami (6) za oceno kumulativnih verjetnosti P_i . Poleg tega pa imamo tudi pri iskanju najmanjše vsote kvadratov razdalj posameznih točk lineariziranega grafa od premice $y = kx + n$ več

možnosti: lahko gre za vodoravne odmike točk od premice (x -regresija), za navpične odmike (y -regresija), lahko pa gledamo »pravokotne« odmike (najkrajše razdalje točk od premice). Zavedati se moramo, da je odločitev za en ali drug kriterij subjektivna, zato se navadno uporablja y -regresija. Pri drugih treh metodah pa nimamo takšnih variacij kot pri LR.

Ker je bistvo uporabljenih metod tako različno, bi bilo naivno pričakovati, da bomo pri vseh dobili enaki vrednosti Weibullovih parametrov, pa čeprav gre za 5100 podatkov. V **tabeli 1** so prikazane vrednosti Weibullovih parametrov, izračunanih po različnih metodah. Za metodo LR je v tabeli prikazan le izid za y -regresijo in funkcijo (6a), čeprav smo preizkusili vseh možnih 12 kombinacij (štiri funkcije in tri vrste regresij). Razlike v okviru metode LR so majhne: izračunani parameter m je v intervalu od 9,315 do 9,355, σ_0 pa je med 305,22 MPa in 305,28 MPa.

Medtem ko se najmanjši in največji izračunani skalirni parameter σ_0 , izračunan po različnih metodah, razlikujeta le za 1,5 %, pa je razlika v Weibullovem modulu m med metodo LR (9,34) in ML (9,05) nekoliko presenetljivo velika: okrog 3 %. Res je splošno znano, da je izračun skalirnega parametra precej zanesljivejši kot izračun Weibullovega modula, vendar bi pri 5100 podatkih vseeno pričakovali manjše odmike v vrednostih m , kot jih dobimo. Zato smo za vse štiri pare Weibullovih parametrov izračunali še korelacijski koeficient R^2 , da bi primerjali zanesljivost metod; izbrali smo funkcijo (6a). Morda se primerjava R^2 za vse štiri metode ne zdi povsem poštena, ker uporabljamo pri tem računu princip, prirejen za metodo LR. Vendar pa ugotavljamo, da je korelacijski koeficient pri vseh metodah zelo visok in skoraj enak.

Za primerjavo, pri Gaussovi porazdelitvi v prejšnjem prispevku v Vakuumistu smo dobili po metodi ML vrednost $R^2 = 0,9855$, pri drugih dveh porazdelitvah, log-normalni in gama, pa je bil še manjši [11]. Torej nam novi izračuni spet dokazujejo, da je Weibullova porazdelitev res pravilna, le njeni parametri so nekoliko negotovi. Kako si torej lahko razložimo tolikšno negotovost v Weibullovem modulu: med 9,05 in 9,34? Celotna porazdelitvena funkcija je pri tolikšnem Weibullovem modulu že kar ozka in očitno dokaj neobčutljiva za manjše variacije tega parametra.

Tabela 1: Izračunana Weibullova parametra za 5100 podatkov po štirih metodah in ustreznih faktor R^2

Metoda	m	σ_0 /MPa	R^2
LR	9,34	305,25	0,9986
ML	9,05	305,50	0,9985
MM	9,25	305,39	0,9987
H	9,24	305,05	0,9987

4.2 Majhne in velike vrednosti trdnosti

Druga težava pri interpretaciji izmerjenih trdnosti s teoretično porazdelitvijo so zelo majhne in zelo velike trdnosti. Izmerjene trdnosti vedno ležijo na omejenem intervalu, pa če jih je še tako veliko, medtem ko segajo teoretične vrednosti po Weibulovi porazdelitvi od nič do neskončno. Ali imajo potem zelo majhne in zelo velike teoretične trdnosti sploh kak praktičen pomen? V primeru 5100 vrednosti trdnosti Al_2O_3 vzorcev v Tolminu je bila najmanjša trdnost okrog 137 MPa, največja pa 400 MPa.

Vprašamo se lahko, kolikšna je teoretična verjetnost, da bo res vseh 5100 vzorcev pri zgoraj ocenjenih Weibullovih parametrih imelo trdnosti med omenjenima vrednostima. Enačba (2) velja za en sam izbran vzorec izmed mnogih, npr. $P(400 \text{ MPa})$ pomeni verjetnost, da izmerjena trdnost ne bo večja od 400 MPa. Podobno pomeni $1 - P(137 \text{ MPa})$ verjetnost, da izmerjena trdnost ne bo manjša od 137 MPa. Pri vseh 5100 vzorcih pa moramo posamezne verjetnosti množiti. Račun pokaže, da je verjetnost, da bodo imeli vsi vzorci večje trdnosti od 137 MPa, samo 5 %. Nasprotno je verjetnost, da bodo imeli vsi vzorci manjše trdnosti od 400 MPa, kar 98-odstotna. Da med 5100 vrednostmi trdnosti nimamo večjih od 400 MPa, je potem kar v skladu s teoretično porazdelitveno funkcijo, pa čeprav nam je jasno, da noben vzorec ne more imeti večjih trdnosti, kot jih dopuščajo medatomske sile.

Zakaj pa potem nima vsaj en vzorec manjše trdnosti kot 137 MPa, čeprav je verjetnost za to 95-odstotna? Prvič, lahko je to čisto naključje, saj gre še vedno za statistične negotovosti in morda bi imel ravno 5101. vzorec trdnost recimo samo 100 MPa. Drugič, statistična analiza, povezana z zlomom materiala na osnovi mehanskih napetosti okrog mikrodefektov, pokaže, da je Weibulova statistika odvisna od kvantitativne velikostne porazdelitve mikrodefektov v snovi [4]. Zato je lahko pri obravnavi majhnih mehanskih obremenitev preprosto napačna. Tako lahko opazimo v literaturi tudi uporabo triparametrične Weibullove porazdelitve namesto dvoparametrične; tretji parameter poleg m in σ_0 je najmanjša teoretična trdnost, ki je večja od nič.

In tretjič, za pomanjkanje majhnih izmerjenih trdnosti je lahko kriv tudi človeški dejavnik s selekcijo izdelkov in vzorcev. Na primer, če operator stroja za nizkotlačno brizganje keramične suspenzije v kalupe vidi, da se je en vzorec ponesrečil in da bo imel slabe mehanske lastnosti, ga preprosto zavrže, namesto da bi ga dal sintrati skupaj z drugimi vzorci.

4.3 Statistika za majhne preizkusne skupine

Pri tej natančni kvantitativni statistični interpretaciji trdnosti pa nas je najbolj zanimala sistematična odvisnost izračunanih Weibullovih parametrov od velikosti preizkusnih skupin in od uporabljenih metod (samo LR, ML in MM, ker je histogramska metoda za majhno število vzorcev neuporabna). Zgoraj smo omenili, da je imela vsaka preizkusna skupina v tolminskem podjetju samo 12 vzorcev, ovrednotili pa smo statistiko za vseh 5100 vzorcev skupaj. To pa ni enako, kot če bi obravnavali vsako preizkusno skupino posebej. Paziti moramo tudi, da razlikujemo sistematsko napako uporabljene metode od resničnih razlik v izračunanih parametrih za različno velike preizkusne skupine.

Dobro znano je na primer, da pri majhnem številu vzorcev N metoda LR daje premajhne vrednosti Weibullovega modula m in nekoliko prevelik σ_0 [5]. Nasprotno daje ML prevelik m in nekoliko premajhen σ_0 [5]. To ugotovitev se da lepo potrditi s simulacijami Monte Carlo (MC), kar smo z izčrpnimi računi večkrat preverili tudi sami [8, 9]. V splošnem je tako negotovost kot sistematična napaka parametra σ_0 veliko manjša kot pri parametru m . Zato se tu omejimo na opis rezultatov za Weibullov modul.

Ker je bilo pri eksperimentu $N = 12$ za vsako proizvodno serijo, se nam je zdelo smiselno za različne velikosti preizkusnih skupin v naših računih vzeti mnogokratnik tega števila. To pomeni, da smo združevali vedno več eksperimentalnih preizkusnih skupin, največ 10 ($N = 120$). Združevanje je šlo po istem vrstnem redu, kot so časovno potekale meritve. S povečevanjem N od 12 do 120 se je pri metodah LR, ML in MM vrednost parametra m spreminjala in to smo primerjali s tremi referenčnimi vrednostmi v **tabeli 1** za 5100 vzorcev (**sluke 1–3**). Razlike so nastale, prvič zaradi večje naključnosti in negotovosti za majhen N , drugič pa zaradi zgoraj omenjene sistematične napake posameznih metod. Vendar obstaja še tretji mogoči vzrok: razmere pri izdelavi vzorcev se lahko od serije do serije nekoliko spreminjajo in to lahko pomeni dodatno sistematično napako glede na veliko število vzorcev. S tem mislimo, da se lahko celotna proizvodnja izdelkov po kvaliteti razlikuje od serije do serije in ne gre le za razlike zaradi naključno izbranih vzorcev iz vsake serije.

Naključno napako zaradi statističnih variacij lahko navadno hitro odstranimo od sistematičnih napak (zaradi naključnega nihanja vrednosti obravnavanega parametra gor ali dol), teže pa razlikujemo eno sistematično napako od druge. Tu si lahko pomagamo s čisto teoretičnimi MC-simulacijami, kjer izberemo kot vhodni podatek neko vrednost Weibullovega modula m_0 , na primer pri preizkusu metode LR vrednost

$m_0 = 9,34$ iz **tabele 1**. Potem izberemo npr. $N = 12$ in zelo velikokrat ponovimo simulacijo, recimo 100 000-krat po 12 vzorcev. Tako dobimo 100 000 različnih vrednosti m , ki se bolj ali manj razlikujejo od vhodne vrednosti m_0 . Vseh teh 100 000 vrednosti m povprečimo, da dobimo $\langle m_{MC} \rangle$. S povprečenjem smo se znebili naključne napake zaradi statističnih variacij. Izkaže se, da se povprečje $\langle m_{MC} \rangle$ razlikuje od m_0 in to tem bolj, čim manjša je vsaka preizkusna skupina (recimo $N = 12$). Kot smo že omenili, v primeru LR metode velja: $\langle m_{MC} \rangle < m_0$. Tako smo ugotovili sistematično napako metode za vsak N posebej in jo vemo vnaprej, ko preverjamo dejanske eksperimentalne trdnosti.

Kako naredimo primerjavo? Recimo, da smo izbrali najmanjšo velikost grupe $N = 12$. Za vseh 5100 vzorcev pomeni to 425 skupin. Za vsako od teh skupin po 12 vzorcev izračunamo z izbrano metodo, npr. LR, drugo vrednost m . Teh 425 eksperimentalnih vrednosti m povprečimo in dobimo $\langle m \rangle$. Vrednost $\langle m \rangle$ se lahko razlikuje tako od $m_0 = 9,34$ kot od $\langle m_{MC} \rangle$ iz MC-simulacij. Z razliko med vrednostima $\langle m \rangle$ in $\langle m_{MC} \rangle$ tako odstranimo eksperimentalni odmik Weibullovega modula (glede na veliko število vzorcev) od sistematične napake same metode. Podobno naredimo tudi za metodi ML in MM.

Vendar smo uporabili za nazornejšo interpretacijo rezultatov drugo pot. Namesto teoretičnih MC-simulacij smo pri vsaki izbiri preizkusnih skupin z računalniškim generatorjem naključnih števil temeljito premešali vrstni red vseh 5100 meritev trdnosti. Torej smo poleg časovno pravilnega vrstnega reda meritev uporabili tudi naključni vrstni red in primerjali rezultate. Tu velja omeniti, da imamo kljub omejenemu številu vseh vrednosti trdnosti (5100) pri naključnem mešanju podatkov veliko več možnosti kot pri časovno pravilnem vrstnem redu.

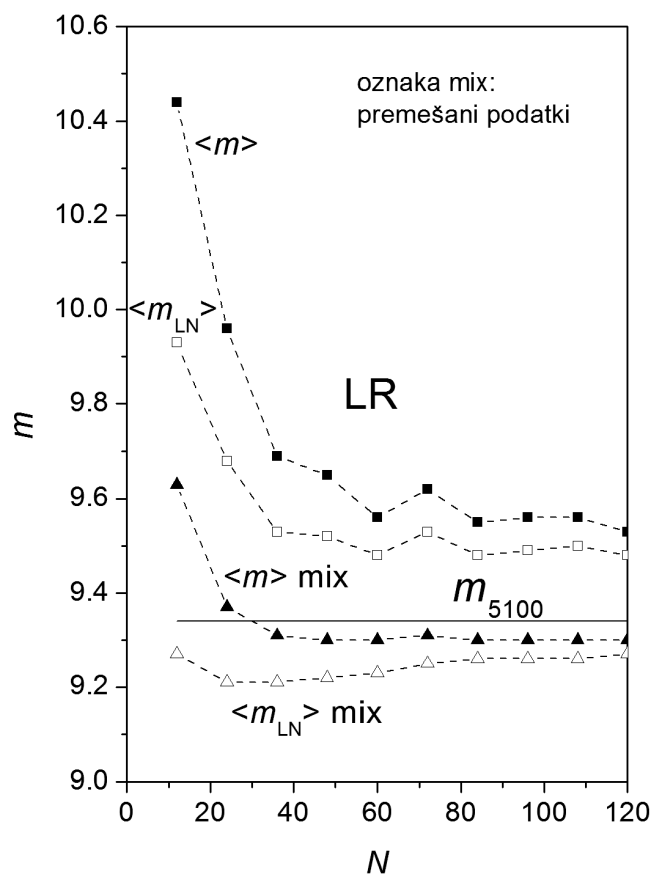
Za lažjo razlago vzemimo spet velikost skupine $N = 12$. Pri časovno pravilnem vrstnem redu smo dobili 425 skupin ter toliko vrednosti m . Ko pa premešamo 5100 meritev in potem razdelimo to po vrsti na 425 skupin s 425 vrednostmi m , lahko mešanje ponovimo in ponovno vse skupaj razdelimo na 425 skupin. Te bodo zaradi ponovnega mešanja seveda drugačne od prvih 425 skupin. To lahko praktično ponavljamo v neskončnost, saj je število mogočih kombinacij, kako 5100 vzorcev razdeliti na 425 skupin po 12, nepredstavljivo veliko. Tako lahko zaradi mešanja učinkovito povprečimo neprimerno več kot 425 vrednosti m in s tem je rezultat zanesljivejši.

Kaj smo sicer z mešanjem eksperimentalnih podatkov sploh dosegli? Zaradi časovne naključnosti smo izničili variacije od serije do serije v proizvodnji. Če torej dobimo veliko razliko v rezultatih za nepremešane in premešane podatke, pomeni to veliko serijsko

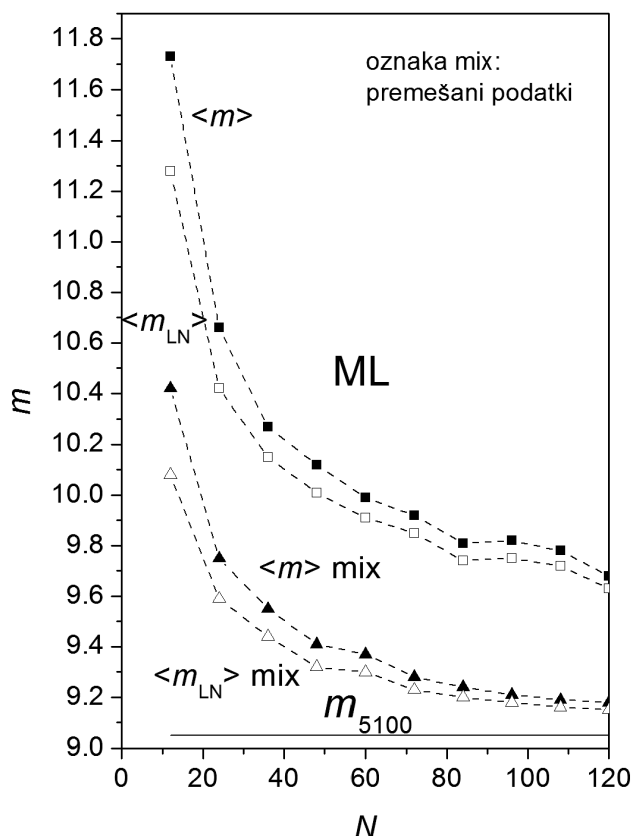
variabilnost, torej tudi nihanje kvalitete izdelkov, kar ni ravno ugodno za podjetje. Omenimo še, da število 5100 ni bilo vedno deljivo z velikostjo vzorčne skupine N . Na primer, pri $N = 24$ je $5100 = 212 \cdot 24 + 12$. V takšnem primeru smo pač vzeli po vrsti 212 skupin po 24 vzorcev, izpustili pa zadnjih 12 meritev.

Slike 1–3 prikazujejo razliko med povprečnim Weibullovim modulom $\langle m \rangle$ za nepremešane in premešane eksperimentalne trdnosti vzorcev v odvisnosti od velikosti skupine N , in sicer za vse tri metode, enačba (8a). Vodoravna asimptota na diagramih prikazuje za primerjavo vrednosti m iz **tabele 1** za vseh 5100 podatkov. Na slikah so prikazane še enake odvisnosti $\langle m_{LN} \rangle$ od N za vse tri metode pri časovno pravilnem vrstnem redu in pri mešanju podatkov, kjer smo namesto navadnega povprečenja Weibullovih modulov vzeli logaritemska povprečja, enačba (8b). Ugotavljamo, da so razlike v m za nepremešane in premešane podatke velike.

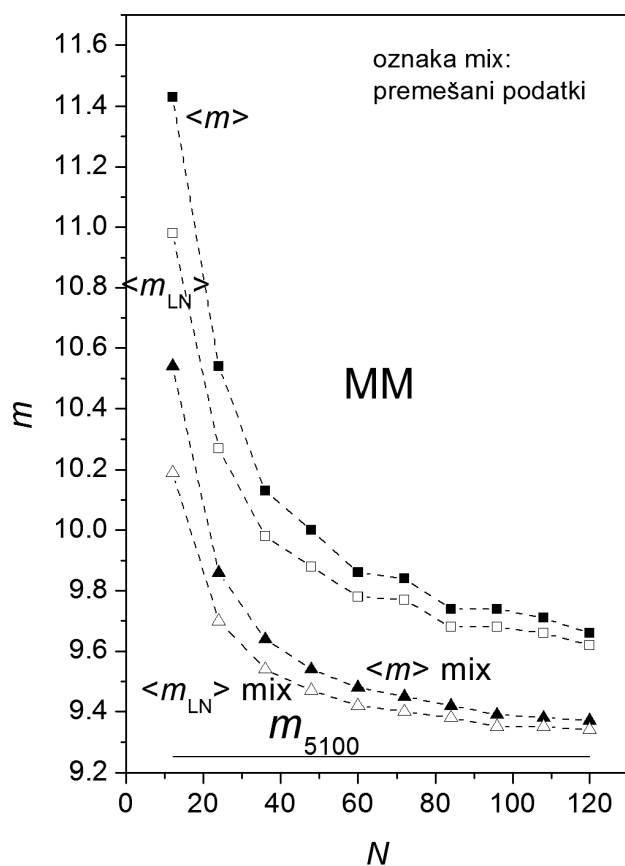
Grafe na slikah se da nazorno razložiti. Prvič, vsa logaritemska povprečenja Weibullovega modula dajejo manjše vrednosti kot navadna povprečenja, kar se da matematično dokazati in tudi izpeljati razmerje



Slika 1: Grafi odvisnosti $\langle m \rangle(N)$ in $\langle m_{LN} \rangle(N)$ pri metodi LR; povprečenje po skupinah velikosti N brez mešanja: direktno (polni kvadrati) in logaritmsko (prazni kvadrati), in s premešanimi podatki: direktno (polni trikotniki) in logaritmsko (prazni trikotniki)



Slika 2: Grafi odvisnosti $\langle m \rangle(N)$ in $\langle m_{LN} \rangle(N)$ pri metodi ML; simboli imajo enak pomen kot pri sliki 1.



Slika 3: Grafi odvisnosti $\langle m \rangle(N)$ in $\langle m_{LN} \rangle(N)$ pri metodi MM; simboli imajo enak pomen kot pri slikah 1 in 2.

med obema povprečjema, če je npr. porazdelitev za m res log-normalna. Drugič, pri metodah ML in MM so vse vrednosti Weibullovih modulov nad limitno vrednostjo, ki smo jo na slikah označili z m_{5100} . To je prav že zaradi sistematske napake obeh metod (precenitev vrednosti m), ki pa se postopno zmanjšuje z večanjem N . Pri metodi LR je stvar nekoliko bolj zapletena: pri premešanih podatkih daje metoda manjši modul od limitne vrednosti, tako kot mora biti (razen pri direktnem povprečenju za $N = 12$ in 24).

Vendar pa so pri nemešanih skupinah povprečne vrednosti m nad limitno vodoravno črto in to je lahko samo zaradi dodatne sistematične napake zaradi variacij kakovosti proizvodnih serij. Kar pa je najbolj bistveno, krivulje za povprečni modul za nepremešane podatke so bistveno nad tistimi za premešane podatke. Manjšo vrednost modula pri premešanih trdnostih se da lepo razložiti: ko vzamemo naključno skupaj npr. 12 vzorcev ne samo iz ene proizvodne serije, temveč iz katere koli serije, se naključnosti izbire iz ene serije pridruži še naključnost kvalitete različnih serij. Zato je logično pričakovati večjo širino Weibullove porazdelitvene funkcije trdnosti, to pa pomeni manjši Weibullov modul. Velike razlike med premešanimi in nepremešanimi trdnostmi kažejo na neugodno velike razlike v proizvodnih serijah.

Na kratko opišimo še rezultate za skalirni parameter σ_0 . Metoda LR daje pri nepremešanih podatkih, ne glede na način povprečenja, direktno ali logaritemsko, nekoliko premajhen skalirni parameter v primerjavi z vrednostjo 305,25 v tabeli 1, za premešane podatke pa preveliko vrednost. To je v skladu s prevelikim modulom m za nepremešane podatke in premajhnim modulom za premešane podatke. Nasprotno dajeta metodi ML in MM v primerjavi z vrednostima za 5100 podatkov nekoliko premajhen povprečni skalirni parameter, ker dajeta prevelik Weibullov modul. V splošnem velja: če daje metoda sistematsko premajhen m , potem daje prevelik σ_0 in nasprotno. Sistematična napaka v skalirnem parametru pa je majhna in je največja pri $N = 12$, med 3 ‰ in 7 ‰, odvisno od metode in načina povprečenja.

5 SKLEP

S primerjavo različnih metod za oceno Weibullovih parametrov smo prišli do enakih sklepov o nihanju kakovosti proizvodnih serij keramičnih izdelkov. To prepoznamo po tem, da je povprečni Weibullov modul za množico preizkusnih skupin pri premešanih podatkih veliko manjši kot pri nepremešanih. Pokazalo se je tudi, da so metode LR, ML in MM v splošnem približno enako zanesljive pri oceni Weibullovega modula, čeprav so vse obremenjene s sistematsko napako pri majhnih preizkusnih skupinah in celo pri

5100 vzorcih ne dajejo iste vrednosti m . Vendar pa to ni tako bistveno, saj smo ugotovili, da napaka nekaj odstotkov v vrednosti m ne pomeni praktično nobene razlike v Weibullovi statistiki, posebno ker vrednost skalirnega parametra σ_0 kompenzira nekoliko drugačno vrednost modula m .

6 Literatura

- [1] W. Weibull, *J. Appl. Mech.*, 18 (1951), 293
- [2] P. Kittl, G. Diaz, *Res. Mech.*, 24 (1988), 99
- [3] N. Orlovskaja, H. Peterlik, M. Marczevski, K. Kromp, *J. Mater. Sci.*, 32 (1997), 1903
- [4] R. Danzer, T. Lube, P. Supancic, *Z. Metall.*, 92 (2001), 773
- [5] D. Wu, Y Li, *Chem. Eng. Sci.*, 56 (2001), 7035
- [6] I. J. Davies, *J. Mater. Sci.*, 39 (2004), 1444
- [7] D. Wu, J. Zhou, Y. Li, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 26 (2006), 1099
- [8] M. Ambrožič, K. Vidović, *J. Mater. Sci.*, 42 (2007), 9645
- [9] M. Ambrožič, L. Gorjan, *J. Mater. Sci.*, 46 (2011), 1862
- [10] L. Gorjan, M. Ambrožič, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 32 (2012), 1221
- [11] M. Ambrožič, L. Gorjan, *Vakuumist*, 32 (2012) 3, 12

MIKROSTRUKTURNE NEPRAVILNOSTI TRDIH PVD-PREVLEK

Peter Gselman, Peter Panjan

Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

ZNANSTVENI ČLANEK

POVZETEK

Čeprav so se trde zaščitne PVD-prevleke izkazale za enega izmed najučinkovitejših načinov povečanja produktivnosti odrezovalnih postopkov, še njihov potencial ni popolnoma izkoriščen, saj je v njih veliko mikrostrukturnih nepravilnosti, kot so poroznost, vključki in predvsem defekti. Ti defekti negativno vplivajo na zelene lastnosti prevlek, zato se različne raziskovalne skupine že vrsto let trudijo zmanjšati njihovo pogostnost. Do sedaj jim je uspelo ugotoviti, kateri so najpogostejši vzroki za nastanek defektov, kot tudi kako le-ti vplivajo na topografijo površine. Bistveni izsledki so zbrani v tem članku.

Ključne besede: PVD-defekti, trde PVD-prevleke, ionsko jedkanje, naprševanje

Microstructural imperfections of hard PVD coatings

ABSTRACT

Hard PVD coatings have been proved as one of the most successful methods for enhancing the cutting process productivity, however, their potential is not yet fully exploited because they contain several microstructural imperfections, such as porosity, inclusions and above all, growth defects. These defects have a negative influence on required coating properties, therefore many research groups have been trying to minimize their concentration. So far, they have been successful in realizing, what are the most common reasons for their appearance, as well as in understanding the mechanism of their influence on topography. The most important findings are reported in this paper.

Keywords: growth defects, PVD hard coatings, ion etching, sputtering

1 UVOD

V trdih prevlekah, ki jih pripravimo z PVD-postopki nanašanja (naparevanje, naprševanje), je veliko mikrostrukturnih nepravilnosti [1–4]. Mikrostrukturne nepravilnosti na nanonivoju so posledica strukturnih napak med rastjo kristalov (dislokacije, meje). Morfološke nepravilnosti na submikrometrski skali so povezane z nukleacijskimi mehanizmi. Odvisno od parametrov nanašanja lahko raste prevleka z grobozrnato ali fino-zrnato mikrostrukturo. Število nukleacijskih mest lahko ustvarimo z ionskim jedkanjem. Čim bolj intenzivno je jedkanje, več je nukleacijskih mest in bolj gladka je površina prevleke.

Mikrostrukturne nepravilnosti na mikrometrski skali so posledica mikrometrskih topografskih nepravilnosti na površini podlag (jamice, vršički) in vgajevanja mikrometrskih delcev (ostanki nečistoč na površini podlag, delci, ki se ustvarijo v napravi za nanos v vseh fazah nanašanja) v rastočo prevleko. O mikrostrukturnih nepravilnostih na makroskali pa govorimo, kadar morfologijo prevleke določajo nepra-

vilnosti na podlagi, ki imajo makroskopske dimenzije (raze, grebeni, brazde, utori, kraterji večjih dimenzij).

Posledica mikrostrukturnih nepravilnosti so poroznost in povečana hrapavost prevleke. Njihov vpliv na fizikalno-kemijske in tribološke lastnosti je znoten, zato so predmet številnih raziskav. Prve raziskave nodularnih defektov v optičnih prevlekah so iz leta 1969 [5]. Takrat so opazili, da so nodularni defekti tista mesta v optičnih prevlekah, ki so najbolj izpostavljena poškodbam, kadar so prevleke izpostavljene močnemu curku laserske svetlobe. Razlog je v tem, da nodularni defekti zaradi svoje oblike delujejo kot zbiralne leče, zato je na teh mestih intenziteta svetlobe veliko večja kot v okolici [6, 7].

V trdih PVD-prevlekah različni defekti (nodularni, jamice) negativno vplivajo na korozijsko obstojnost, omočljivost, oprijemljivost, trenje in obrabno obstojnost prevleke. Zato si raziskovalci prizadevamo, da bi gostoto takšnih defektov minimizirali. Da bi to lahko naredili, moramo razumeti vzroke za njihov nastanek.

2 RAST PVD-PREVLEK

Da bi razumeli, kaj vse povzroči nastanek mikrostrukturnih nepravilnosti v PVD-prevlekah, si moramo do podrobnosti ogledati fizikalno-kemijske in druge procese, ki vodijo do njihovega nastanka.

Nanašanje PVD-prevlek je tristopenjski proces: najprej v izviru razgradimo (uparimo) masivno snov na atome, jih v obliki atomskih curkov prenesemo skozi vakuum do trdnih podlag, kjer jih kondenziramo v obliki tanke plasti. Ta na videz preprost tehnološki postopek spremljajo različni fizikalno-kemijski pojavi, ki potekajo hkrati ali zaporedoma v trdni, tekoči in plinski fazi. Ti procesi so: uparitev (razprševanje, izparevanje, sublimacija), adsorpcija, nastajanje kali in kondenzacija na podlagah (rast zarodkov, koalescenca), prekristalizacija, kemijske reakcije nastajajoče prevleke s podlago in preostalim plinom. Vsi ti procesi potekajo močno neravnotežno (prenasičenost uparjenih par, podhladitev podlag), zato se v prevleko vgradi veliko število strukturnih napak (točkastih defektov, dislokacij).

Rast prevlek je zelo odvisna od vrste in topografije materiala podlage (hrapavost, vključki, delci nečistoč), kemijskega stanja površine podlage (sestava, kontaminacija), napak na površini (npr. razpoke, raze), izplinjavanja podlag med segrevanjem, preferenčnih nukleacijskih mest in stabilnosti površine. Pomembni

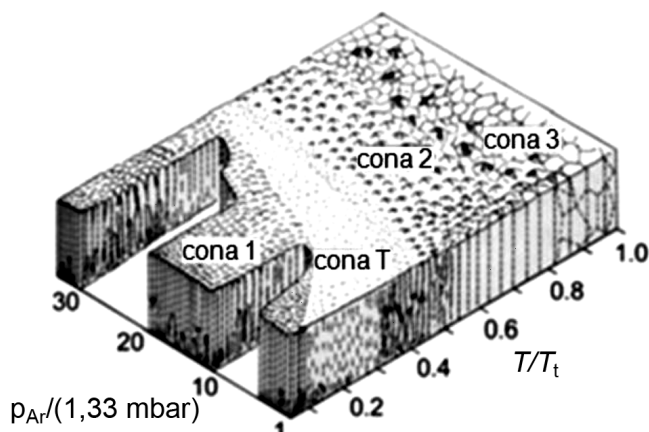
dejavniki so še temperatura podlag, kinetična energija uparjenih delcev, stopnja njihove ionizacije in električni potencial na podlagah. Na rast vpliva tudi preostali plin v vakuumski posodi, ki se vgrajuje v prevleko in jo onesnažuje. Preostali plini desorbirajo iz vakuumske posode, iz tarče oz. lončka za izparevanje, iz črpalk, iz zraka, ki vdira iz okolice skozi netesnosti. Posebej na rast prevlek vplivajo plini, ki jih pri reaktivnem nanašanju (naparevanju, naprševanju) namenoma dodajamo, da bi zagotovili rast prevleke z željeno kemijsko sestavo.

Drugi sklop parametrov, ki vplivajo na rast prevleke, so delovne razmere pri nanašanju: temperatura podlag, hitrost nanašanja, kotna porazdelitev uparjenih atomov, čistota preostale atmosfere v vakuumski posodi, obstreljevanje rastoče prevleke z energijsko bogatimi delci. Trde PVD-prevleke rastejo s kondenzacijo atomov na podlagi. Mikrostruktura prevleke pa ni odvisna samo od vrste materiala, temperature podlage in tlaka delovnega plina (argon), ampak tudi od gostote toka in energijske porazdelitve vseh delcev, ki obstreljujejo rastočo prevleko. Vsi ti parametri vplivajo na volumensko in površinsko difuzijo, na nastajanje točkastih defektov, amorfizacijo ali rekristalizacijo in nukleacijo. Povečanje površinske migracije adsorbiranih atomov lahko dosežemo na več načinov, npr. s povečanjem temperature podlage, z zmanjšanjem tlaka delovnega plina, povečanjem električne napetosti na podlagah (t. i. *bias*).

3 MIKROSTRUKTURA PVD-PREVLEK

Mikrostruktura PVD-prevlek je torej odvisna od številnih dejavnikov [3, 4, 8]. Mochvan in Demchishin [5] sta prva naredila **pasovni model mikrostrukture** (PMM), s katerim sta pokazala, kako so strukturni pasovi odvisni od razmerja temperatur nanašanja (T_p) in temperature tališča (T_t) izbrane snovi $F = T_p/T_t$.

Pozneje je Thornton dopolnil njun model tako, da je upošteval vpliv tlaka delovnega plina (P) na mikrostrukturo in v pravokotnem polju, omejenem s koordinatama P in F , identificiral štiri pasove z različnimi mikrostrukturami. V prvem pasu, kjer je razmerje $F = T_p/T_t < 0,3$, raste porozna prevleka z odprto stebričasto mikrostrukturami (**slika 1**). Na površini imajo stebri obliko kupole. Takšna rast je posledica majhne gibljivosti atomov, ki prispejo na površino podlage, in efekta geometrijskega senčenja. Kristalna zrna rastejo v smeri, ki se sklada s smerjo vpadnih atomov. V coni 2 ($0,3 < T_p/T_t < 0,5$) rastejo gosto zloženi stebričasti (vlaknasti) kristali. Velikost zrn raste z razmerjem T_p/T_t in praviloma se raztezajo čez vso debelino prevleke. Površina stebričastih zrn je gladka. Takšna rast je že posledica površinske difuzije atomov. V coni T ($T_p/T_t \leq 0,5$) se premer stebričastih zrn zaradi volu-



Slika 1: Strukturni diagram con prevlek, narejenih z naprševanjem, ki ga je predlagal Thornton [9]

menske difuzije ali rekristalizacije poveča. Taka prevleka je bolj gosta, njena površina bolj gladka, kristalna zrna pa imajo stebričasto obliko. Pri še višji temperaturi (cona 3) igra pomembno vlogo volumenska difuzija, zato so za mikrostrukturo tega pasu značilna ekvialna zrna.

Struktura prevlek je torej zelo odvisna od gibljivosti atomov, ki prispejo na površino podlage. Energijo, ki jo atomi potrebujejo za površinsko difuzijo, prejmejo bodisi od vroče podlage (termična energija) ali od visokoenergijskih delcev iz izvira za nanašanje ali plazme, s katerimi obstreljujemo rastočo prevleko. Povečana gibljivost je lahko tudi rezultat kemijskih reakcij, ki potekajo v prevleki.

Obstreljevanje rastoče prevleke z energijsko bogatimi ioni ima zelo močan vpliv na njeno mikrostrukturo. S povečevanjem energije ionov se zmanjša poroznost na mejah stebričastih zrn, gostota defektov pa se poveča. Pri dovolj intenzivnem obstreljevanju z ioni je gostota defektov zadosti velika, da se prekine stebričasta rast, hkrati pa se pojavijo nova nukleacijska mesta za nastanek novih zrn. Poleg energije ionov pa je pomembna tudi gostota toka ionov. Z večjo gostoto ionov se poveča gibljivost atomov na površini, poveča se število novih nukleacijskih mest. Hkrati se kristalna zrna razširijo, ker vpliv povečane gibljivosti atomov prevlada vpliv povečanega števila nukleacijskih mest. Z ionskim obstreljevanjem spremenimo tudi teksturo prevleke. Ta je tehnološko pomemben parameter, saj je večina njenih lastnosti odvisna od kristalografske smeri.

Na rast prevlek pomembno vpliva kotna porazdelitev vpadnih atomov. Ta je značilna za vsak sistem za nanašanje posebej. Če je izvir za uparitev točkast, razdalja med izviro in podlago pa velika, je kotna porazdelitev v izbrani točki podlage majhna, vendar pa zelo različna na različnih mestih podlag. Če pa uparjeni atomi izhajajo iz izvira z veliko površino,

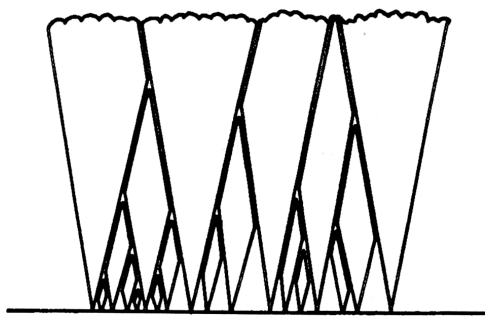
potem je kotna porazdelitev v izbrani točki podlage velika in različna za različna mesta na podlagi. Z ustreznim vpetjem in rotacijo podlag lahko zagotovimo homogeno gostoto in kotno porazdelitev uparjenih atomov.

Stebričasta morfologija prevleke, ki raste na gladkih podlagah, je posledica preferenčne rasti zrn z različno kristalografsko orientacijo. Zrna z različno orientacijo rastejo različno hitro, ker gibljivost atomov na kristalnih ravninah z različno orientacijo ni enaka (slika 2). Čim manjša je površinska difuzija atomov, večja je hitrost rasti. Posledica različne hitrosti rasti je, da se z debelino prevleke kontinuirano spreminja njena morfologija, tekstura in topografija njene površine. Zato z debelino narašča tudi hrapavost, ki je primerljiva z velikostjo kristalnih zrn.

Za mikrostrukturo prevleke ob meji s podlago so značilna naključno orientirana majhna zrna. Nekatera od teh, ki imajo ustrezno orientacijo, rastejo hitreje in prehitijo preostale. Širijo se kot stebričasta zrna v obliki črke V (stožčasta morfologija). Na mejah med stebričastimi zrnji je veliko praznin, ki so posledica geometrijskega senčenja med rastjo prevleke. Na rast kristalnih zrn močno vpliva dodatek zlitinskih elementov, dopantov ali nečistoč.

Morfologija prevleke pa ni odvisna samo od gibljivosti atomov na površini rastoče prevleke, ampak tudi od hrapavosti površine podlage. Če je površina podlage hrapava, potem je sprememba vpadnega kota atomov vzrok za nastanek zapletene morfologije. Na konico vršičkov hrapave površine prispejo atomi iz vseh smeri, in če je gibljivost atomov majhna, raste prevleka na tem mestu hitreje kot v sosednjih »dolinah«. Atomi od izvira do podlage potujejo premočrtno, zato vršički zastirajo »doline« (geometrijsko senčenje). Prevleke, ki rastejo na hrapavih podlagah, imajo v splošnem tudi manjšo gostoto. Stebričasto rast opazimo tako v kristaliničnih kot amorfni prevlekah. Posamezno stebričasto zrno ni enovit kristal (monokristal), pač pa je sestavljen iz manjših ekviaksialnih zrn ali pa je v celoti amorfen.

Tudi izbira vrste podlage ima velik vpliv na mikrostrukturo prevleke [11, 12, 13]. Vzemimo za primer



Slika 2: Shematski prikaz stebričaste morfologije [10]

nanos trde TiN-prevleke na podlago iz večfaznega materiala (npr. hitroreznega jekla). Hitrorezno jeklo vsebuje karbidne vključke vrste MC (M je v osnovi vanadij) in M_6C (M sta v osnovi molibden in volfram), ki so vgrajeni v martenzitno osnovo, v kateri pa so še ostanki zaostalega avstenita. Velikost karbidnih vključkov je v območju od 1 μm do 5 μm , volumenski delež pa 10–20 %. Mikrostruktura TiN-prevleke na takšni podlagi je zato nehomogena, saj je nukleacija in začetna rast zelo odvisna od lokalne strukture hitroreznega jekla. Na martenzitni osnovi in karbidih M_6C raste TiN-prevleka z gosto stebričasto mikrostrukturo. Premer stebrov, ki rastejo na martenzitni osnovi, je blizu meje s podlago približno dvakrat večji od tistih, ki rastejo na karbidih M_6C . Razlika v mikrostrukturi z debelino postopno izgine.

Na karbidih MC pa raste prevleka epitaksialno. Kristalno zrno se v nekaterih primerih (odvisno od temperature podlage) razteza skozi celotno debelino prevleke. Faza MC ima enako kristalno strukturo kot TiN (ploskovno centrirana kubična – *fcc*). Neujemanje mrežnih parametrov je manj kot 1,6-odstotno. Epitaksialna rast trde TiN-prevleke na karbidnih zrnih MC izboljša njeno oprijemljivost na podlago. Zato se z večjo koncentracijo karbidnih zrn MC na površini poveča tudi oprijemljivost [14].

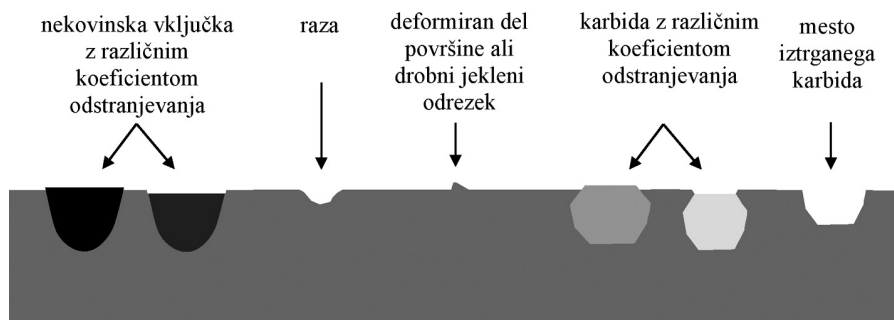
4 MIKROSTRUKTURNE NEPRAVILNOSTI NA MIKRO- IN MAKRONIVOJU

V prejšnjem poglavju smo opisali, kako parametri nanašanja PVD-prevlek (temperatura, hitrost nanašanja, tlak, ionsko obstreljevanje) vplivajo na mikrostrukturo in topografijo PVD-prevlek.

Poleg opisanih fizikalno-kemijskih procesov, ki povzročijo nastanek stebričaste strukture PVD-prevlek s specifično topografijo površine na submikronivoju, pa obstaja še vrsta procesov, ki vodijo do nastanka mikrostrukturnih defektov na mikro- in makronivoju. Tako najdemo v prevlekah veliko t. i. nodularnih defektov in drobnih luknjic (angl. *pinhole*). Za nastanek nodularnih defektov so odgovorne vse tiste nepravilnosti na površini podlage, ki so večje od 0,1 μm (vršički, raze), in zlasti majhni delci submikrometrski velikosti, ki ostanejo na površini podlag po čiščenju (prah, ostanki polirnega sredstva, nečistoče) ali pa nastanejo med procesom nanašanja prevleke. V nadaljevanju bomo opisali, kaj so izviri takšnih nepravilnosti na površini podlag in kje vse so izviri tujih delcev, ki se vgradijo v prevleko.

4.1 Površina orodnih jekel po poliranju

Določene topografske nepravilnosti se pojavijo na površini podlag iz orodnih jekel že v fazi brušenja in



Slika 3: Shematski prikaz površinskih napak orodij, nastalih med poliranjem in brušenjem

poliranja. Pogost problem je »prepoliranje«. Ta pojem uporabimo za stanje, ko se začne po določenem času poliranja gladkost površine jekla slabšati. Razlog sta bodisi t. i. »pomarančnolupinski« pojav (angl. *orange-peel effect*) ali pa jamičasti pojav (angl. *pitting*) [13].

Pomarančnolupinski pojav nastane pri poliranju jekla, če je tlak polirnega orodja velik in če so časi poliranja dolgi. Pri tem velja, da je trša faza v jeklu manj občutljiva za velike pritiske in da se mehkejša faza polira hitreje (slika 3), zato se na površini pojavijo vršički in vdolbine. Čas poliranja, pri katerem se pojavi »prepoliranje«, je odvisen od trdote materiala, ki ga poliramo. Najpogostejša reakcija večine operaterjev na pojav »prepoliranja« je nadaljevanje poliranja v upanju, da bodo površino popravili. V resnici pa jo samo še poslabšajo. Problem »prepoliranja« rešimo samo tako, da poškodovano površino najprej zbrusimo z brusnim papirjem, ki smo ga uporabili dva koraka pred poliranjem, nato pa nadaljujemo bolj fino brušenje in poliranje, vendar pri manjšem pritisku kot pri predhodnem poliranju.

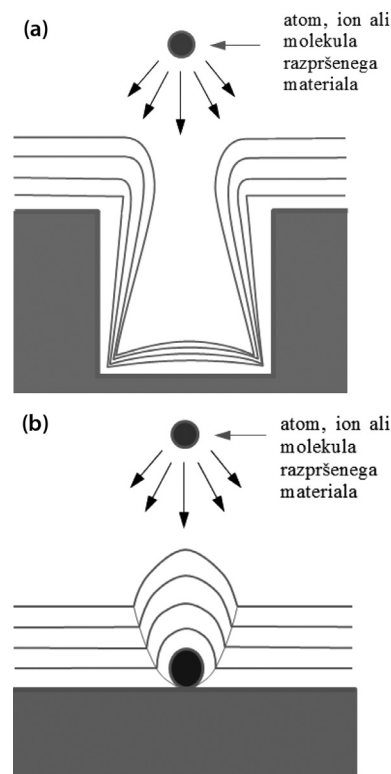
Druga težava, ki se pogosto pojavi med poliranjem, je t. i. jamičasti efekt. Med poliranjem se na površini pojavijo majhne jamice, katerih velikost je primerljiva z velikostjo karbidnih in drugih vključkov. Jamice nastanejo, ker se trdi in krhki vključki oksidov in karbidov med poliranjem iztrgajo s površine orodja (slika 3). Čim daljši je čas poliranja in čim večji je tlak, več jamic (iztrganin) nastane na površini. Njihova gostota je odvisna tudi od čistote jekla, orodja za poliranje in vrste abraziva.

Eden od razlogov, zakaj nastanejo jamice, je v razliki med trdoto vključka in matrice. Ker je trdota vključkov večja od trdote matrice, je med poliranjem hitrost odstranjevanja slednje večja od hitrosti odstranjevanja vključkov. Vključki zato štrlijo s površine. Kadar je stična površina med vključkom in matrico majhna, se vključki zaradi velikih strižnih sil iztrgajo s podlage in za seboj pustijo jamico. Ta problem je bolj izrazit, kadar je značilna velikost zrn diamantne paste manjša od 10 μm in kadar uporabimo mehko polirno orodje (npr. klobučevino). Kadar uporabimo diamantno pasto z velikostjo zrn 10 μm in manj, ne smemo

uporabiti mehkega polirnega orodja, pritisk med poliranjem mora biti čim manjši, čas poliranja pa čim krajši.

Vse topografske nepravilnosti na površini podlage se prenesejo na površino prevleke. Zaradi geometrijskega senčenja postanejo še bolj izrazite (slika 4). Če je razmerje med globino in premerom jamice preveliko, potem prevleka ne prekrije jamice. Na tem mestu je v prevleki drobna luknjica (*pinhole*). Na mestih karbidov pa opazimo vršičke.

Poleg karbidnih vključkov pa najdemo v jeklih tudi veliko nekovinskih vključkov, ki imajo drugačno (večjo ali manjšo) trdoto od osnove, zato se tudi na teh mestih pojavijo drobni kraterji oz. vršički (slika 3). Najpogostejši nekovinski vključki so na osnovi MnS, Al_2O_3 , SiO_2 ter različni mešani oksidi. Takšne vključke



Slika 4: Shematski prikaz nastanka defekta zaradi geometrijskega senčenja na: (a) vdolbini in (b) izboklini oz. tujem delcu

najdemo v vseh jeklih. Nastanejo v fazi izdelave jekla in se jim ne moremo v celoti izogniti. Njihova koncentracija na površini jekla je približno 1–2-odstotna.

Na površini poliranih orodnih materialov ostane tudi veliko drobnih delcev. To so lahko drobni odrezki na osnovi železa, ki se oprimejo na površino namagnetene podlage. Zato je zelo pomembno, da pred kemijskim čiščenjem v ultrazvočni kopeli podlage razmagnetimo. Na površini podlag so tudi ostanki polirne paste, ki se ujamejo na mestih, kjer so iz podlage med brušenjem ali poliranjem iztrgani karbidi (slika 3).

Površino orodij, ki so bila izdelana z žično ali potopno erozijo, praviloma peskamo z glinico, zato da odstranimo t. i. belo plast. V tej fazi se lahko na mejah kristalnih zrna ujamejo drobna zrna peskalnega sredstva. Verjetnost za to se zmanjša, če izberemo optimalne parametre peskanja (peskalni material, tlak, vpadni kot, povprečna velikost zrn peskalnega materiala) za izbrano jeklo. Velja pravilo, da mora biti velikost zrn peskalnega sredstva primerljiva z velikostjo kristalnih zrn v jeklu. Če so manjša, potem obstaja večja verjetnost, da se ujamejo na mejah kristalnih zrn jekla, če pa so prevelika, obstaja nevarnost, da bo prišlo do plastične deformacije površine jekla, še zlasti, če je tlak peskanja velik [15, 16].

Takoj po mehanski predobdelavi (brušenju, honanju, poliranju ali lepanju) moramo površino očistiti in odstraniti ostanke abraziva, procesnih tekočin in ostankov obdelave. Površine morajo biti brez nečistoč, kot so ostanki čistil, prstni odtisi, maziva, hladilna sredstva, rja, opilki, vosek, lepilni trak, barva, silikon, prah, plastika, obloge in tuji delci, kar še posebej velja za slepe luknje. Nečistoče najbolj učinkovito odstranimo tako, da površino orodja obrišemo z bombažno krpo, nato pa ga v grobem kemijsko očistimo z etanolom v ultrazvočni kopeli. V nasprotnem primeru se polirna sredstva skupaj z drobnimi nečistočami zasušijo na površini orodnega materiala in jih je v kasnejši fazi zelo težko odstraniti. Takoj po čiščenju površine orodja jo moramo zaščititi proti rjavenju z lahkim oljem. Uporabiti je treba hidrofobne vodotopne korozijske inhibitorje na osnovi olj. Konzervacijsko sredstvo ne sme vsebovati silikona. Uporaba pretiranih količin olja ni primerna. Olje se mora odstraniti s standardnim alkalnim postopkom čiščenja brez puščanja ostankov.

4.2 Površina orodnih jekel po kemijskem čiščenju

Pred nanosom PVD-prevlek moramo podlage, na katerih so olja, prstni odtisi in druge nečistoče, kemijsko očistiti. Za čiščenje se najpogosteje uporabljajo alkalni detergenti pri temperaturi okrog 60 °C. Sledi izpiranje podlag s sanitarno vodo in izpiranje z desti-

lirano vodo. Slednja mora biti zelo čista. Vsi mikroskopsko majhni delci iz vode kontaminirajo površino podlag. Na njihovih mestih se pojavijo nodularni defekti v prevleki, ki imajo tudi desetkrat večji premer. Vodo očistimo tako, da gre najprej skozi mehanske filtre (5 µm in 3 µm), nato skozi kolono z aktivnim ogljem, kolono s kationsko in anionsko smolo. Nazadnje gre voda še skozi kolono z UV-žarnico. UV-svetloba prepreči nastajanje alg in mikroorganizmov v vodi. Te se v vodi pojavijo, kadar ultrazvočna naprava ni dlje časa v uporabi (npr. konec tedna).

S časom uporabe se aktivno oglje, kationska in anionska smola onesnažijo, zato je čiščenje vode manj učinkovito. Čistoto vode nadzorujemo tako, da merimo njeno električno prevodnost. Ko naraste nad neko kritično vrednost, moramo oglje in smole zamenjati oz. regenerirati [17].

Po izpiranju z deionizirano vodo moramo podlage posušiti z vročim in zelo čistim zrakom. Ker so v stisnjem zraku ostanki olj, vode in prašni delci, moramo tudi zrak očistiti in osušiti. Očistimo ga z ustreznimi filtri. Z vročim zrakom (90 °C), ki ga pod pritiskom skozi šobe usmerimo na podlage, le-te osušimo.

Praviloma jih takoj po čiščenju šaržiramo v napravo za nanos prevlek, sicer pa je priporočljivo, da jih damo v vakuumski sušilnik ali vsaj v navaden sušilnik, ki je na temperaturi okrog 40 °C. Očiščene podlage moramo shraniti v čistem prostoru in naj ne pridejo v stik z drugimi površinami, še zlasti ne, če gre za polimere. Za pasivno shranjevanje so najpriročnejše steklene posode, ki jih po napolnitvi izčrpamo (ekskikatorji). Za aktivno shranjevanje očiščenih podlag pa so najprimernejši prostori z ozonom ali izvirom ultravijolične svetlobe.

Pravilna priprava, ravnanje in hranjenje očiščenih podlag imajo izjemen vpliv na kakovost prevlek. Zato je prvi korak k zmanjšanju kontaminacije podlag ureditev procesnih prostorov, to je prostorov, kjer se nahajajo podlage in kjer se odvija proces njihovega čiščenja in nanašanja prevleke. Iz teh prostorov je treba odstraniti vse nepotrebne vire onesnaženja.

Naslednji vir nečistoč, tako prašnih delcev kot raznih aerosolov, je samo osebje, zaposleno pri pripravi podlag in nanašanju prevlek. Zaposleni ne smejo uporabljati izdelkov, ki proizvajajo prašne delce ali izdelke, ki oddajajo pare, kot so kreme za roke, obraz ipd. Izviri onesnaževanja so tudi obleke ljudi, ki med premikanjem v prostoru oddajajo velike množine delcev.

Kontaminacijo podlag zmanjšamo tudi z upoštevanjem nekaterih tehnoloških zahtev. V splošnem velja, da morajo biti podlage čim manj časa izpostavljene nekontrolirani okolici. Zato je treba vse neobhodno

potrebne postopke kemijskega čiščenja s hlapnimi kemikalijami opravljati v dobro odsesanih delovnih prostorih. Med postopkom čiščenja jih je treba držati v prijemalnih iz materiala, ki se ga da z lahkoto čistiti. Ravnanje z očiščenimi podlagami naj bo vedno z orodji (prijemala, pincete) iz primerne materiala. Kadar to ni mogoče, je treba uporabljati take rokavice, ki nimajo vlaken in iz katerih čistilne raztopine ne morejo ekstrahirati nekaterih snovi. Naslednji korak k preprečevanju kontaminacije podlag je uporaba majhnih »čistih« delovnih površin (miz, pultov, digestorijev, brezprašnih komor) s filtriranim zrakom [18].

4.3 Površina orodnih jekel po šaržiranju

Velik izvir prašnih delcev je vakuumska komora za nanašanje PVD-prevlek. V primeru, ko v njih nanašamo trde PVD-prevleke, se na nosilcih podlag, ščitih, izvrih za nanašanje in drugih komponentah v komori naberejo debeli nanosi iz predhodnih šarž. Ker so v njih velike notranje in termične napetosti, se debele plasti krušijo in padajo na nosilec podlag in na dno vakuumske posode (slika 5). Ta proces je zlasti intenziven v fazi segrevanja komore na delovno temperaturo (okrog 450 °C) in med ohlajanjem. Razlog je v razliki termičnih raztezkov prevleke in podlage.

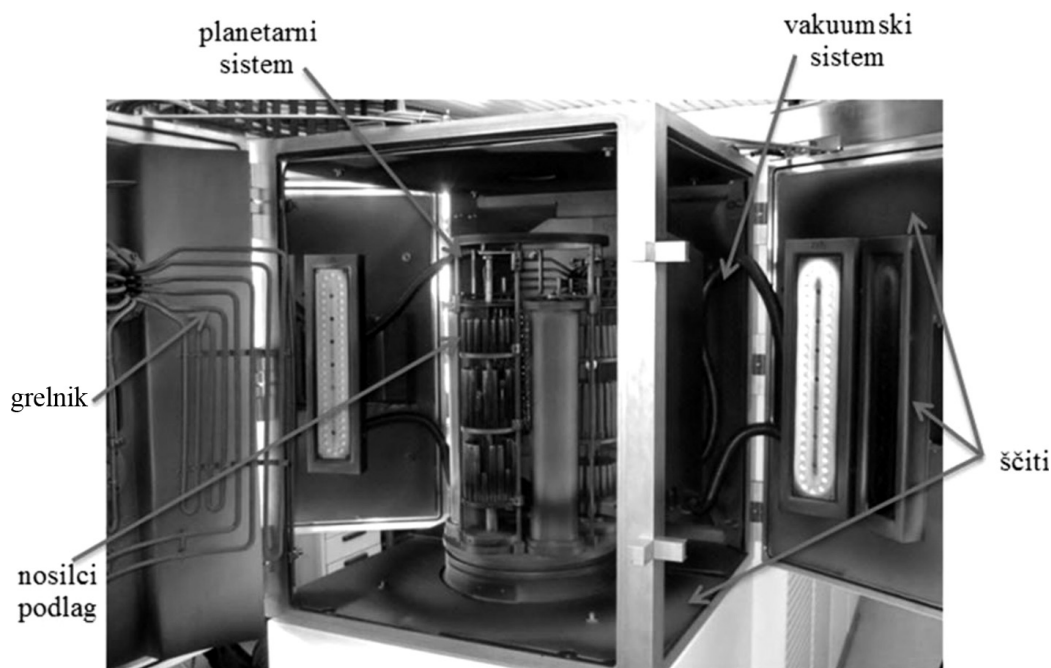
Med nanašanjem debelejših prevlek se nanosi krušijo tudi zaradi velikih tlačnih napetosti, ki naraščajo linearno z debelino oz. s časom nanašanja. Pred šaržiranjem podlag v vakuumsko posodo moramo le-to temeljito očistiti, nosilce podlag, ščite in druge komponente, na katerih se nabira nanos, pa občasno speškati. Druga možnost, ki se prakticira, pa je, da

naredimo vzdrževalni nanos tanke plasti čiste kovine, v kateri tlačne napetosti niso zelo velike. Ta kovinska plast ublaži učinek notranjih in termičnih napetosti.

Med šaržiranjem moramo uporabljati zaščitne rokavice (bombažne ali iz lateksa), da ne kontaminiramo podlag. Priporočljivo je, da preden zapremo vakuumsko komoro, s curkom čistega zraka ali dušika odstranimo prašne delce, ki so med šaržiranjem padli na površino podlag.

Obstaja velika nevarnost, da se prašni delci, ki so ostali na dnu vakuumske komore, v fazi grobega črpanja (do 100 mbar) usedejo na podlage. To se zgodi, če je hitrost črpanja z atmosferskega tlaka do približno 100 mbar (grobi vakuum) velika [19]. V tem primeru se pojavi turbulentni tok v komori, ki dvigne prah z dna posode. Temu problemu se izognemo tako, da vakuumski sistem opremimo z ventilom, ki se samodejno pripre, ko je v komori grobi vakuum oz. se odpre, ko je tlak nižji od 100 mbar.

Črpanju do visokega vakuuma sledi segrevanje podlag do delovne temperature, ki je v primeru trdih prevlek 450 °C. Segrevamo lahko z infrardečimi grelniki ali z elektroni iz termoionskega plazemskega loka. Zlasti v prvem primeru obstaja velika nevarnost, da se s površine grelnikov zaradi termičnega raztezanja odkrušijo delci nanosa. Drobci le-tega lahko padejo na podlage. Sicer pa med pregrevanjem podlag na visoki temperaturi pride do desorpcije vlage. Pri tem se desorbira tudi vlaga z nosilcev, ščitov in drugih komponent vakuumske komore. Pomembno je, da se izplinjevanje zgodi pred začetkom nanašanja prevleke. Če bi se to zgodilo med nanašanjem, bi se plast kontaminirala.



Slika 5: Prikaz odprte komore naprševalnika z označenimi viri onesnaženja podlag

4.4 Površina orodnih jekel po ionskem jedkanju

Ionsko jedkanje je zadnja faza čiščenja orodnih jekel pred nanosom trde prevleke [12, 20, 21]. Z ionskim jedkanjem odstranimo adsorbirane nečistoče in vrhnjo plast podlage debeline približno eno do dve desetinki mikrometra. Tako očiščena površina je prvi pogoj za dobro oprijemljivost prevleke. Oprijemljivost se izboljša tudi zato, ker se zaradi jedkanja poveča efektivna kontaktna površina med prevleko in podlago in ker se na površini podlage tvorijo dodatna nukleacijska jedra, na katerih začne rasti prevleka.

Pri obstreljevanju površine trdne snovi z inertnimi ioni, ki imajo relativno veliko energijo, nastane izbijanje atomov tarče (podlage). Vsak ion argona izbije enega ali več atomov podlage. Razpršitveni koeficient, ki je merilo hitrosti razprševanja (jedkanja), je odvisen od vrste podlage, energije, vpadnega kota in mase ionov. Različni materiali se torej različno hitro jedkajo. V večkomponentnih materialih, kakršna so npr. orodna jekla, zato nastanejo topografske spremembe na njihovi površini. Tako se npr. molibden-volframova karbidna zrna v orodnem jeklu jedkajo hitreje kot železna matrica, vanadij karbidna in krom karbidna zrna pa počasneje. Tudi hitrosti jedkanja na mestih nekovinskih vključkov so precej drugačne od tiste za osnovni material (**slika 3**).

Zato se na mestih, kjer je jedkanje hitrejše, pojavijo plitve luknjice; na mestih, ki se jedkajo počasneje pa plitvi vršički. Tudi kristalna zrna v železni matrici, ki imajo različno orientacijo, se jedkajo z različno hitrostjo. Vse to so razlogi, da se hrapavost površine podlage po ionskem jedkanju v primerjavi s polirano poveča za več kot dvakrat.

V praksi se uporabljajo različni načini ionskega jedkanja. Jedkamo lahko z ioni inertnega delovnega plina (argona, kripton) iz plazme. Podlage so lahko na enosmernem (DC), izmeničnem potencialu v srednjefrekvenčnem področju (MF) ali radiofrekvenčnem (RF) potencialu. Stopnjo ionizacije delovnega plina in s tem intenzivnost jedkanja povečamo, ča ga uvajamo skozi plazmo v votli anodi. Govorimo o t. i. »booster-skem« jedkanju. Slaba stran tega načina jedkanja je, da v votli anodi nastanejo preboji. Na mestu preboja se sestavni deli, ki so iz bakra in tantala, stalijo in delovni plin odnese nastale mikrokapljice do podlag. Na mestih kapljic po nanosu prevlek nastanejo nodularni defekti (s premerov okrog 10 μm), ki poslabšajo adhezijo prevlek.

V napravah, kjer za nanos prevlek uporabljamo izvire s katodnim lokom, se za jedkanje površin uporablja kovinske ione. Najpogosteje se uporabljajo kromovi ioni, medtem ko je uporaba drugih ionov (npr. titan, aluminij) omejena zato, ker pri teh izviri izhaja

veliko drobnih mikrokapljic, ki se ujamejo na površino podlag.

Topografske spremembe, ki so nastale na površini podlag med ionskim jedkanjem, se po nanosu prevlek prenesejo tudi na njeno površino.

4.5 Površina orodnih jekel po nanosu trde PVD-prevleke

Tudi v fazi nanašanja PVD-prevlek nastanejo topografske spremembe, ki so odvisne od samega postopka nanašanja in od vgrajevanja različnih defektov. Znano je, da se pri nanašanju trdi PVD-prevlek s postopkom naparevanja s katodnim lokom hrapavost bistveno poveča (tudi za 10-krat). Pri tem postopku se material upari delno v obliki atomov, delno v obliki mikrokapljic. Mikrokapljice so tiste, ki znatno povečajo hrapavost. V manjšem obsegu se mikrokapljice pojavijo tudi pri drugih postopkih nanašanja prevlek. Vzrok so električni preboji v vakuumski komori, ki so najpogosteje posledica nečistoč na tarčah in nosilcih podlag.

Mikrokapljice pa niso edini razlog za povečanje hrapavosti. Le-ta se poveča tudi zaradi najrazličnejših defektov, ki nastanejo v prevleki iz različnih razlogov. Najpogosteje nastanejo zato, ker se različni mikroskopsko majhni delci, ki ostanejo na površini orodja v fazi čiščenja, šaržiranja v prašnih prostorih, ali tisti, ki se iztrgajo z notranje stene vakuumske posode in vpenjal, prekrijejo s trdo prevleko. Kot je bilo že omenjeno, se tlačne napetosti v prevlekah nanosa, ki se nanašajo na nosilec podlag, ščite in druge komponente vakuumske komore, povečujejo s časom nanašanja. Kadar presežejo neko kritično vrednost, prevleke razpokajo in se spontano luščijo.

Poleg makroskopskih delcev, ki zaradi gravitacije padejo na dno vakuumske posode, nastane tudi veliko (sub)mikroskopsko majhnih delcev. Le-ti so razpršeni v prostor. Pri prehodu skozi plazmo se lahko pozitivno naelektrijo, zato jih električna napetost (angl. *bias*) potegne na podlage. Elektrostatske sile so pri mikroskopsko majhnih delcih veliko močnejše od gravitacije. Delci, ki se ujamejo na podlage, jih rastoča prevleka prekrije in zaradi efekta geometrijskega senčanje na teh mestih nastane nodularni defekt.

Čim daljši je čas nanašanja, tem večja je koncentracija takšnih delcev in večja je koncentracija nodularnih defektov v prevleki. Veliko takšnih delcev nastane zlasti, kadar nastane preboj na nosilec ali druge komponente, na katerih je debela plast nanosa. Na mestu preboja se prevleka zelo segreje, zato se znatno povečajo tudi termične napetosti. Te pa so vzrok, da prevleka razpoka.

Pri magnetronskih izviri je težava neenakomerna erozija materiala tarče. Tarča se najhitreje jedka na

mestih, kjer sta magnetno polje in posledično gostota plazme največja. Med nanašanjem nastane ponovni nanos materiala iz tega dela tarče v okolico njegovega oboda. Ponovno nanosen material na tem mestu je zelo porozen, zato so na tem področju pogosti preboji (slika 6). Posledica prebojev je nastanek drobnih delcev. Večina od njih potuje v smeri podlag, kjer jih prevleka prekrije [19].

Preboji so pogostejši tudi v primeru, če uporabimo tarče, narejene s tehnologijo prahov. Te imajo manjšo gostoto od tistih, ki jih naredimo s klasičnim postopkom. Ker so torej nekoliko porozne, se v pore ujamejo plini. Ko začnemo razprševanje, se tarča segreje in ujeti plini začnejo intenzivno izhajati iz nje. Ker tlak na teh mestih zelo naraste, nastanejo preboji in posledično mikrokapljice. Preboji lahko nastajajo tudi med nosilci podlag in nekovinskimi vključki tarč. Nekovinski vključki v večini primerov niso prevodni materiali, zato se pri razprševanju nabijajo, ko pa naboj doseže kritično vrednost nastane preboj. Tudi v tem primeru skozi vključek steče velik električni tok, ki upari vključek kot tudi okoliški material tarče (slika 6). Uparjeni material z velikostjo delcev do $5 \mu\text{m}$ se odloži na stene vakuumske posode. Majhen del pa se vgradi v prevleko orodij in poslabša njihovo kakovost.

Ne smemo pozabiti še en izvira mikroskopsko majhnih delcev. Da bi zagotovili enakomeren nanos prevlek na orodja s komplicirano geometrijo, jih namestimo na nosilec podlag, ki zagotavlja večkratno rotacijo (v splošnem trikratno). To pomeni, da imamo na nosilcu veliko gibljivih delov. Ker proces nanašanja poteka v visokem vakuumu in pri visoki temperaturi, se vrtljivi deli praviloma ne mažejo (izjemoma z trdimi mazivi). Zaradi trenja nastane na kontaktnih vrtljivih delov veliko drobnih (železnih) delcev, ki se lahko ujamejo na površino podlag in kasneje prekrijejo s prevleko (slika 5).

Drobni (sub)mikrometrski delci, ki nastanejo na opisanih načinih, so »kali«, iz katerih zraste nodularni defekt. Na mestih teh »kali« raste prevleka neodvisno od okolice in iz geometrijskih razlogov hitreje tako v smeri pravokotno na podlago kot tudi v lateralni smeri.

Oblika nodularnega defekta in meja med njim ter okoliško prevleko je odvisna od geometrije »kali«. Če ima »kal« gladko morfologijo, potem nastane nodularni defekt v obliki stožca. Če pa ima kompleksno obliko, potem nastane nodularni defekt nepravilne oblike. Iz ene kali nastane en nodularni defekt, če pa se blizu skupaj nahajata dve ali več kali, potem se nodularni defekti »zlijejo« v defekt, sestavljen iz več stožcev.

Ko se sosednja dela prevleke z vključka in okolice stakneta, se ne zlijeta, saj se kristalografske smeri v kristalnih zrnih ne ujemajo. Zaradi efekta senčenja je meja med defektom in okoliško prevleko zelo porozna. Vež z okolico je zelo šibka, zato se nekateri od nodularnih defektov iztrgajo iz prevlek in za sabo pustijo luknjo (*pinhole*). Vzrok za izbitje so velike tlačne napetosti v prevleki. Iz geometrijskih razlogov je smer rezultante teh napetosti na mestu defekta pravokotno proč od podlage. Luknje, ki tako nastanejo, lahko segajo do podlage, in to so tista mesta v prevleki, kjer nastane jamičasta korozija.

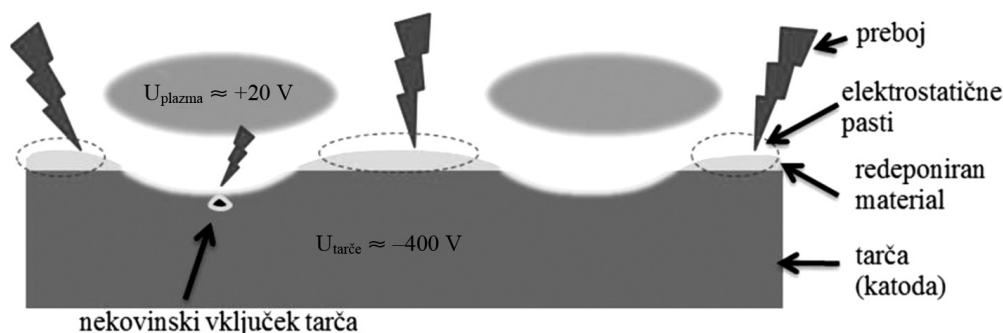
Kot smo že omenili, nastanejo drobne luknjice tudi na mestih, kjer so bili iz podlage med brušenjem in poliranjem iztrgani karbidi. Jamičasta korozija pogosto nastane tudi po poroznih mejah med nodularnim defektom in podlago, seveda v primeru, kadar ta zraste s kali na podlagi.

5 DELITEV DEFEKTOV PVD-PREVLEK GLEDE NA NJIHOVO MORFOLOGIJO

Defekte v trdih PVD-prevlekeh lahko razdelimo glede na njihov nastanek ali morfologijo. V praksi se je najbolj uveljavila delitev glede na morfologijo. Tako ločimo kraterje, nodularne defekte in pore.

5.1 Kraterji

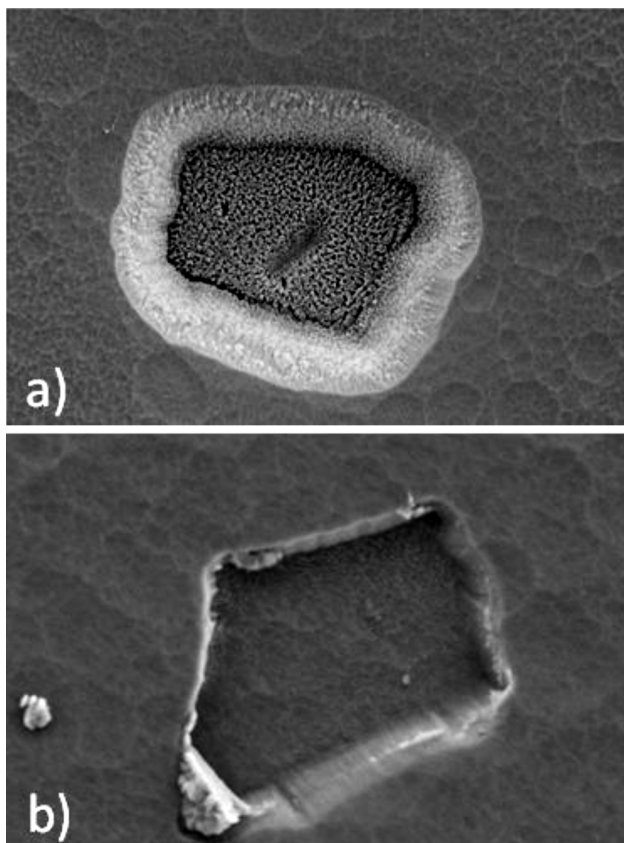
Kraterji nepravilne oblike spadajo v skupino največjih defektov. Njihov premer je od $5 \mu\text{m}$ do nekaj $10 \mu\text{m}$ (slika 7). Nastanejo lahko na dva načina. Del kraterjev nastane na velikih vdolbinah na površini



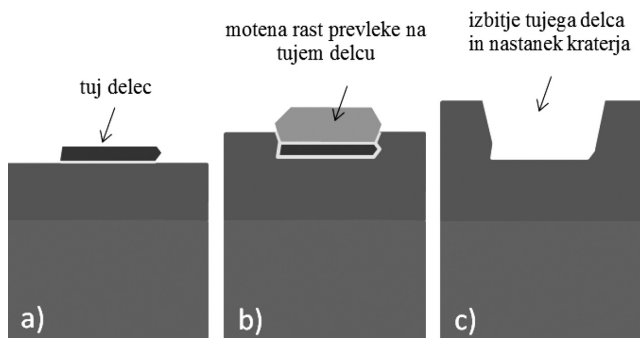
Slika 6: Shematski prikaz nastanka prebojev na prečnem prerezu tarče [22]

podlage, kjer so se v fazi mehanske priprave iztrgali karbidi (slika 7a).

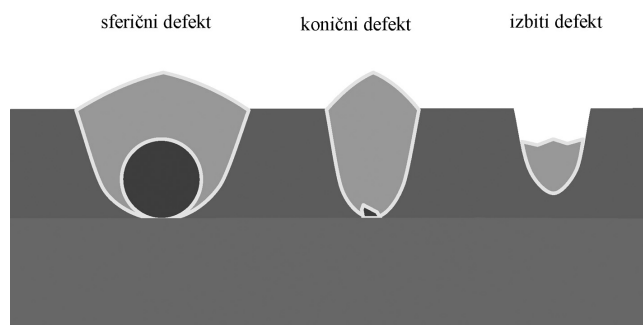
Druga vrsta kraterjev nastane na tistih mestih, kjer se med jedkanjem, segrevanja ali nanosa na vzorec odložijo koščki tuje plasti ($> 5 \mu\text{m}$). Le-ta se najpogosteje zaradi termičnih napetosti odluči s površine grelnikov. Naneseni koščki plasti se slabo povežejo z okoliškim materialom prevleke. Zato se med procesom nanosa zaradi slabe oprijemljivosti in tlačnih notranjih napetosti spontano iztrgajo (sliki 7b in 8).



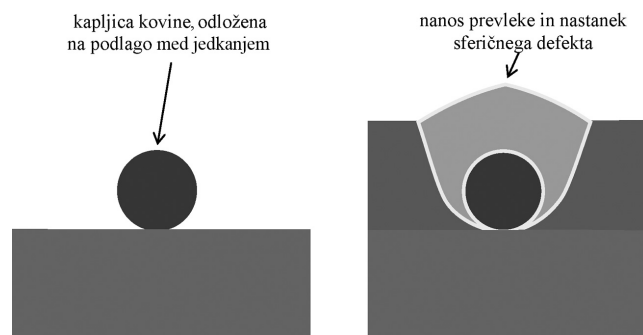
Slika 7: Kraterji v PVD-prevlekeh: (a) primer kraterja, ki je nastal kot posledica vdolbine na površini podlage, in (b) primer kraterja, ki je nastal zaradi iztrganja tujega delca med nanosom PVD-prevleke



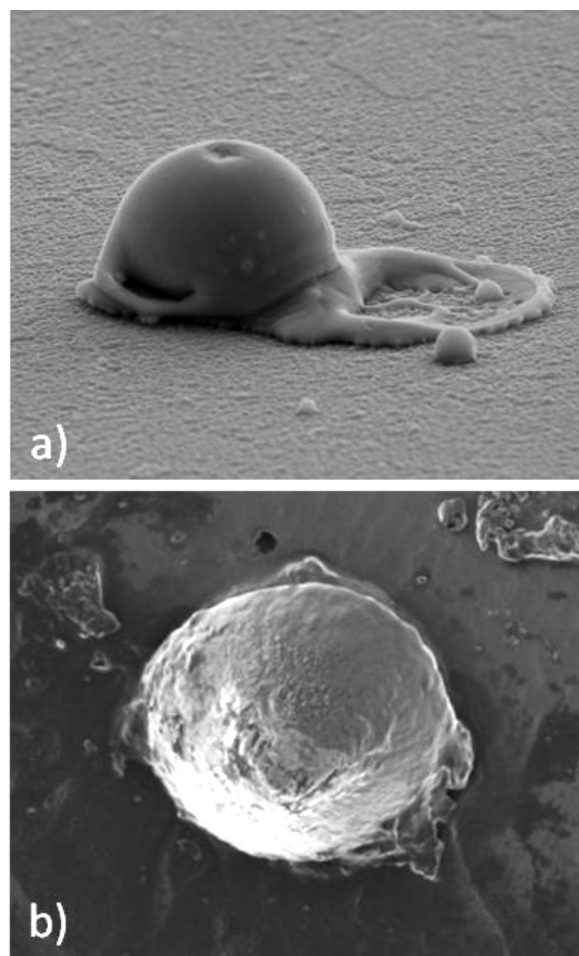
Slika 8: Shematski prikaz nastanka kraterja v PVD-prevleki: (a) na rastočo prevleko prileti tuj delec; (b) rast prevleke na tujem delcu in naraščanje notranjih napetosti; (c) izbitje tujega delca ob preseženi kritični vrednosti notranjih napetosti in nastanek kraterja



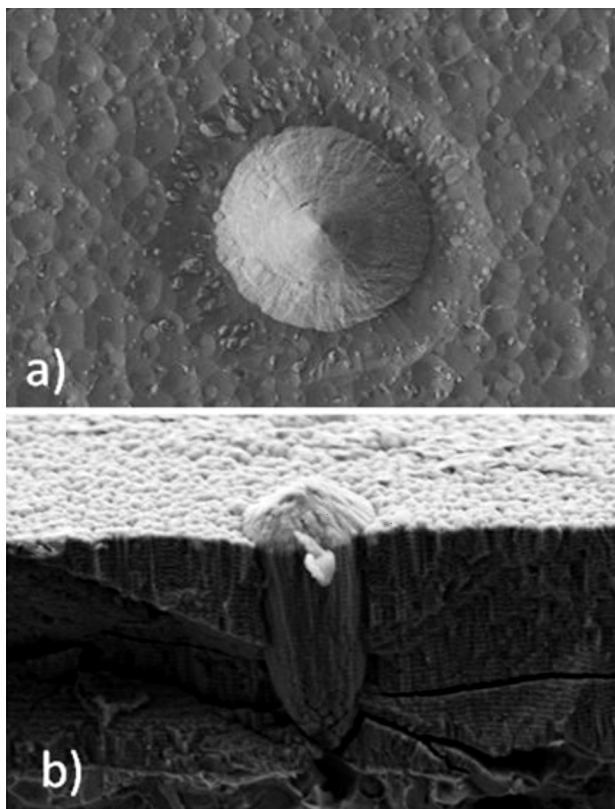
Slika 9: Shematski prikaz treh vrst nodularnih defektov



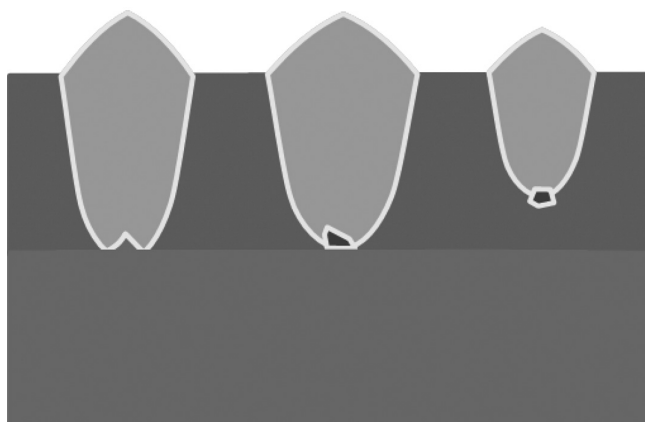
Slika 10: Shematski prikaz nastanka defekta v obliki sferične kapljice



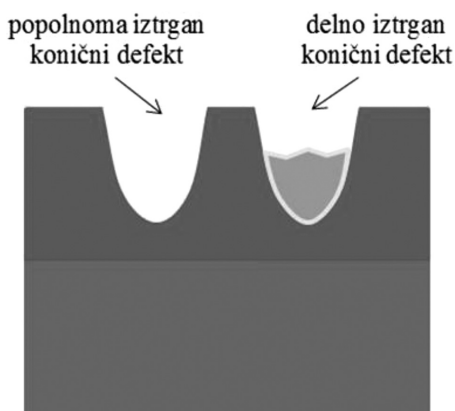
Slika 11: SEM-posnetek kapljice: (a) raztaljena kovina po jedkanju površine ter (b) po nanosu PVD-prevleke in s tem nastanku defekta v obliki sferične kapljice



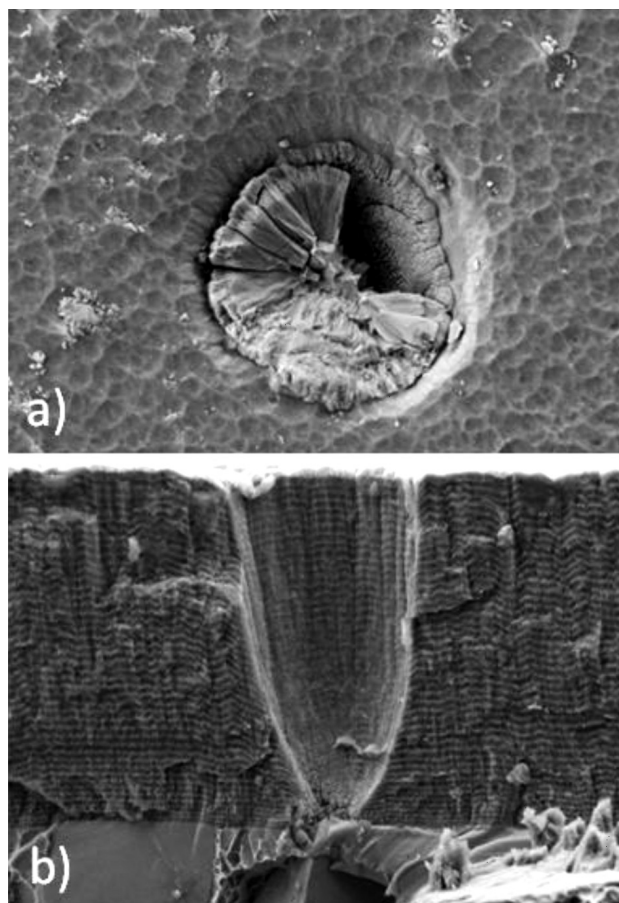
Slika 12: SEM-posnetek koničnega defekta: (a) pogled od zgoraj in (b) s prečnega prereza



Slika 13: Shematski prikaz vrst koničnih defektov



Slika 14: Shematski prikaz globokega in plitkega izbitega defekta



Slika 15: Primer izbitega defekta z (a) delno in (b) popolno iztrganim koničnim defektom

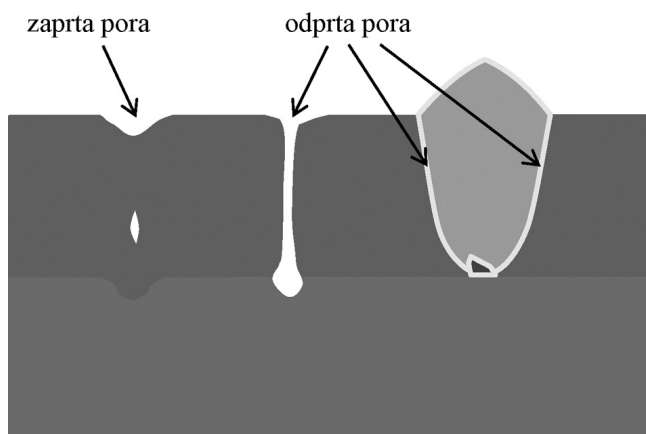
5.2 Nodularni defekti

Nodularne defekte delimo po obliki na sferične, konične in izbite defekte (slika 9). Razlikujejo se po vzroku nastanka, skupna pa jim je velikost, ki je v območju od 1 μm do 10 μm .

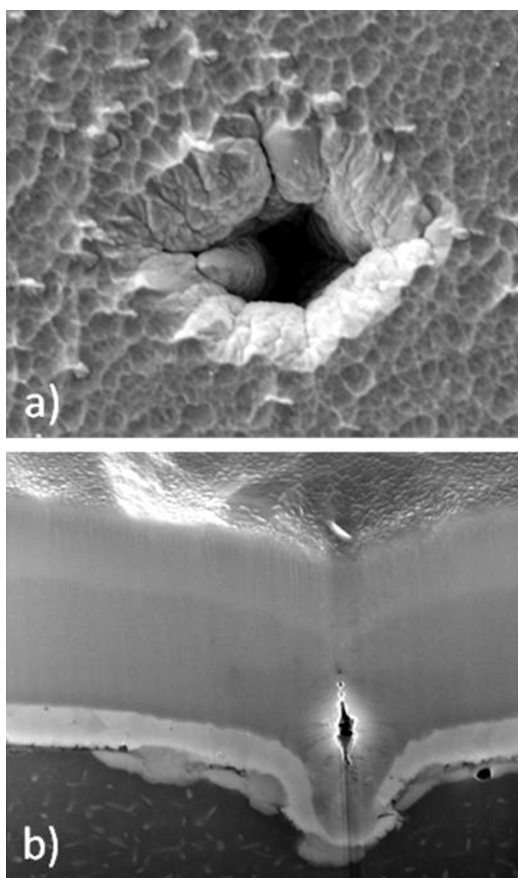
Defekti v obliki **sferične kapljice** nastanejo na mikrokapljicah (večjih od 1 μm). Te mikrokapljice nastanejo zaradi prebojev med postopkom jedkanja ali nanašanja (sliki 10 in 11a). V procesu nanašanja pa se prekrijejo s prevleko (slika 11b). Premer sferičnih defektov je od 1 μm do 10 μm .

Velikost **koničnih defektov** ne presega 5 μm . Ime so dobili po konični obliki glave defekta z vrhom premera okoli 1 μm (slika 12). Nastanejo na zelo majhnih delcih (0,05–1 μm), ki so ostali na površini podlag po čiščenju, ali na tistih, ki se odložijo na podlago med črpanjem, segrevanjem, ionskem jedkanju ali pa med procesom nanašanja prevleke (slika 13).

Izbiti defekti so v osnovi konični, pri katerih je prišlo do spontanega iztrganja konične glave ali celotnega defekta zaradi notranjih napetosti v prevleki (sliki 14 in 15).



Slika 16: Shematski prikaz zaprte in odprte pore



Slika 17: Primer pore: (a) odprta in (b) zaprta

5.3 Pore

Luknjice manjše od 1 μm , ki se raztezajo skozi celotno prevleko, imenujemo pore. Nastanejo zaradi napak na površini podlage. Ena izmed prevladujočih površinskih napak podlag so vdolbine s premerom velikostnega reda mikrometra. Široke in plitke vdolbine motijo rast prevleke le na začetku procesa, saj ob določeni debelini prevleke le-ta zapre poro, nakar raste nemoteno (slika 16). Takšne PVD-defekte imenujemo zaprte pore (angl. *keyholes*, slika 17b).

Ozke in globoke vdolbine pa motijo rast prevleke skozi ves proces. Pri tem nastanejo odprte pore (*pinholes*), ki segajo skozi vso debelino prevleke (sliki 16 in 17a). Odprte pore se pojavljajo tudi na meji med nodularnim defektom in prevleko (slika 16).

6 SKLEP

Čeprav PVD-prevleke rastejo v vakuumu, se med njihovo pripravo vanje vgrajuje veliko tujih delcev, ki povzročajo rast PVD-defektov. Vir teh delcev je lahko prah, nečistoče na površini vzorcev, preboji med jedkanjem in nanosom ter luščenje že nanesenih plasti s komponent vakuumskega sistema. Nukleacijska mesta defektov so tudi površinske napake podlag. To so najrazličnejše vdolbine in izbokline na površini vzorca, ki poleg tujih delcev prav tako povzročajo geometrijsko senčenje. Ta efekt nastane zaradi rotacije vzorcev med procesom nanosa prevlek. Tako tok uparjenega materiala, ki sicer skozi vakuum potuje premočrtno, ni vedno pravokoten na površino podlage. V času nepravokotnega toka uparjenega materiala vdolbine, izbokline in tuji delci na površini podlage s svojo obliko zastirajo pot uparjenim molekulam, ionom in atomom in tako motijo rast prevlek. Območje, kjer je rast prevleke motena, ima porozno mikrostrukturo, s tem pa tudi slabše fizikalno-kemijske in tribološke lastnosti.

7 LITERATURA

- [1] D. M. Mattox, *Surf. Coat. Technol.*, 81 (1996), 8
- [2] D. M. Mattox, *SVC Bulletin*, spring 2009, 30
- [3] D. M. Mattox, *Handbook of Physical vapor deposition (PVD) processing*, Noyes Publ., Westwood, 1998
- [4] R. F. Bunshah, *Handbook of hard coatings*, Noyes Publ., New Jersey, 2001, 108–180
- [5] B. A. Movchan, A. V. Demchishin, *Fiz. Met. Metalloved.*, 28 (1969) 4, 653
- [6] R. J. Tench, R. Chow, M. R. Kozlowski, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 12 (1994) 5, 2808
- [7] X. Liu, D. Li, Y. Zhao, X. Li, J. Shao, *Appl. Surf. Sci.*, 256 (2010), 3783
- [8] I. Petrov, P. B. Barna, L. Hultman, J. E. Green, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 21 (2003) 5, S117
- [9] J. A. Thornton, *J. Vac. Sci. Technol.*, 11 (1974) 4, 666
- [10] R. Messier, *J. Vac. Sci. Technol.*, 3 (1986) 4, 490
- [11] U. Helmersson, J. E. Sundgren, J. E. Green, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 4 (1986) 3
- [12] A. P. Ehasarian, J. G. Wen, I. Petrov, *J. Appl. Phys.*, 101 (2007), 054301
- [13] www.uddeholm.com/files/polishing-english.pdf.pdf, zadnjič dostopano 1. 12. 2013
- [14] U. Helmersson, H. T. G. Hentzell, L. Hultman, M. K. Hibbs, J. E. Sundgren, *AIP Conference Proceedings*, 149 (1986), 79
- [15] P. Panjan, *Vakuumist*, 23 (2003) 4, 27
- [16] P. J. Slikkerveer, P. C. P. Bouten, F. H. in 't Veld, H. Scholten, *Wear*, 217 (1998), 237
- [17] P. Panjan, *Vakuumist*, 18 (1998) 2, 28
- [18] J. Gasperič, M. Maček, *Vakuumist*, 18 (1998) 1, 30
- [19] G. S. Selwyn, C. A. Weiss, F. Sequeda, C. Huang, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 15 (1997) 4, 2023
- [20] H. M. Babriel, H. H. Kloos, *Vakuum Technik*, 8 (1984), 242
- [21] E. Taglauer, *Appl. Phys. A*, 51 (1990), 238
- [22] A. Anders, *Thin solid films*, 502 (2006) 1–2, 22–28

PRVI TESLOVI STIKI Z VAKUUMSKIMI TEHNIKAMI

(ob 70-letnici smrti)

3. del

Stanislav Južnič

ZNANSTVENI ČLANEK

Univerza v Oklahomi, Oddelek za zgodovino znanosti, Norman, Oklahoma, ZDA / Občina Kostel, 1336 Kostel

6 IZGON

Tesla je imel veliko priložnosti v naglo se razvijajočem Spodnjem Štajerskem. Tehniške novosti so se vedno bolj uveljavljale. Kagerjeva kovinska delavnica in livarna sta opremili svoj obrat z motornim pogonom, potem ko je obrtna delavnica začela obratovati leta 1737 oziroma stoletje pozneje. Razvila se je v sodobno podjetje – obrtni obrat, leta 1889, potem ko so leta 1859 ukinili cehe.¹⁹⁰ Pasarstvo in srebrarstvo Kager je tako najstarejše mariborsko podjetje in eno od predhodnikov Mariborske livarne.

Leta 1868 ustanovljena Denzlova (Denc) zvonarna je podarila Mariborčanom industrijsko tradicijo,¹⁹¹ podobno kot Heričkovo lončarstvo, ki je najprej uporabljalo plinske motorje. Ko so se ti izkazali predragi, je uvedlo v začetku 20. stoletja bencinske motorje Sinkovičevega podjetja, v katerem so pred začetkom 1. svetovne vojne začeli izdelovati elektromotorje. Uporaba električne energije je bila vedno pogostejša, ko se je Frohmova kovaška obrt v zadnjih letih 19. stoletja razvijala v industrijsko livarno. Obrtniki se zaradi vpliva železnic pogosto niso ukvarjali le z eno stroko, temveč so radi uvajali postranske obrate brez povezav z osnovno dejavnostjo; Frohm je ob livarni vodil oljarno, destilacijo, kisarno, žganjekuho in še vinsko

<i>Tscheligi Franz</i> <i>Explosion mit Spiritusfessel</i>	1990, 2065	1440
<i>Tscheligi Franz</i> <i>Explosion mit Spiritusfessel</i>	2010	650 578
<i>Tesla Nikola</i> <i>Explosion mit Spiritusfessel</i>	2160, 2675	2160
<i>Tegethhofstrasse</i> <i>Explosion mit Spiritusfessel</i>	2215, 4040, 10199	2215

Slika 1: Teslov izgon iz Maribora pod številkami 2160 in 2675¹⁸⁸

¹⁸⁸ SI_PAM/0005, fond Mestne občine Maribor, (knjiga) K 22 – Indeks 1879 (splošna registratura)

¹⁸⁹ Prav tam, Delovodnik 1879 (splošna registratura), napis na platnici delovodnika

¹⁹⁰ Podgoršek, 2006, 366; Baš, 1934, 34

¹⁹¹ Zvonarna in livarna g. Janeza Dencela in sinov v Mariboru (30. 10. 1879) (*Slovenski gospodar*, letnik 13, številka 44; *Slovenski gospodar*, 25. 12. 1879)



Slika 2: Naslovna stran poslovnega protokola mariborskih oblasti¹⁸⁹

trgovino. Penggova tovarna zvonov je nasledila Denclovo in kasneje Bühlovo zvonarno in livarno. Prav tako ob Meljski cesti blizu пристanišča je od leta 1902 obratovala tudi tovarna strojev in železolivarna na strojni pogon Antona Bendla iz Gradca, ki jo je Ježek z Moravske kupil med letoma 1908–1910 kot eno redkih močnih slovanskih podjetij v Mariboru.

Ime obrtnika	Številka	Dnevi	Opombe
<i>1125 Denclova</i>	1125	17. 7. 1873	...
<i>1126 Denclova</i>	1126
<i>1127 Denclova</i>	1127
<i>1128 Denclova</i>	1128
<i>1129 Denclova</i>	1129

Slika 3: Obrt Teslovega mojstra Družka, mestnega čevljarja z Leitnerhofgasse št. 234 Josefa Druschkovitsha (Družkovič, Družkovič), vpisana pod zaporedno številko 1125 dne 17. 7. 1873 s št. 6504 v obrtni register mesta Maribor (SI_PAM/0005, K 531 – Obrtni registri vodeni na podlagi obrtne zakonodaje 1859–1907: register za proste in rokodelske obrti 1866–1883)

Leta 1894 je kemik Swaty spraval v pogon mariborsko tovarno brusov,¹⁹² »Kovina« na Tezmem pa prav tako ni bila od muh. V Mariboru so imeli veliko tovarno stekla, leta 1884 pa že 13 inženirjev: nadinženir Mauras Franzc, vdova po inženirju Schnablu Theresa Schnabl, Carl Arletter, Byloff, J. Eger, F. Hallmann, Anton Heimann, Adelbert Markhl (Markl), Franz Nowak, J. Prodnigg, C. Rakoneli, Josef Swoboda, arhitekt mariborskega teatra železniški okrožni inženir Adam Wiesinger,¹⁹³ župan Nagy pa komaj leta 1898. V Teslovem času je v Mariboru deloval že inženir W. Fischer, ki je daroval novoletni forint tako kot pisec mariborskega telegrafskega priročnika iz leta 1872 Johann Kral ali strojnika Hartl in Franz Mayer.¹⁹⁴ Kral je bil predstojnik biroja mariborske telegrafske postaje¹⁹⁵ v Teslovem času.

Leta 1869 so ustanovili mariborsko plinaro, nato so leta 1870 uvedli moderno plinsko razsvetljavo. Malo po Teslovem odhodu so Mariborčani aprila 1883 kot prvi v tem delu Evrope s 36 žarnicami opremili javno cestno razsvetljavo lastnika mariborskega parnega mlina Karla Scherbauma. Scherbaumovo podjetje je imelo mlinske obrate v Mariboru, Framu in v Bistrici. Mlin v Bistrici je imel pred koncem stoletja že lastno elektrarno s turbinami; leta 1883 je bil njegov mariborski obrat prvi v Avstriji opremljen s pečmi W. A. E. Wieghorstovega hamburškega podjetja, ki so bile 1. 3. 1882 patentirane v Londonu.¹⁹⁶ Scherbaumi so skupaj z Josefom Frankim, Luko Lavtarjem in drugimi podpirali mariborsko filharmonično društvo, Gustav Scherbaum pa se je pozneje včlanil v *Schlarafia Marburgia*.¹⁹⁷ Nekaj dni za Scherbaumom je ključavničarski mojster Jožef Martini v svoji izložbi na Vetrinjski ulici uporabil električno luč in pripravljal podobno osvetlitev izložbe trgovca Jožefa Martinza v Gosposki ulici.

Leta 1889 je Puhov svak Franc Neger (* 1859; † 1944) iz Bischofegga pri Ivniku (Eibiswald) v Mariboru ustanovil tovarno koles in šivalnih strojev. Sam Janez Puh (Puch, * 1862; † 1914) je kljub ključavničarskim učenim letom v Rotmanu (1874–21. 2. 1877) blizu domačih Juršincev oziroma Oblačka in v Radgoni (1877/78) svojo tovarno koles raje postavil v Gradcu leta 1889 in 1899, čeprav je spodnještajerske rojake rad obiskoval.¹⁹⁸ Leta 1886 so v Celju ustanovili

Cillier Radfahrer Verein. Njim je bil kot protiutež organiziran leta 1891 Klub biciklistov kot del celjskega Sokola. Leta 1898 so utemeljili Delavski kolesarski klub Maribor, v katerem so bili večinoma slovenski mariborski železničarji.

V Teslovem mariborskem času so se številne možnosti za bivanje odprle v »Hišah Južnih delavnic železničarske kolonije« pri kolodvoru Studenci na desnem bregu Drave. Največji mariborski obrat so bile delavnice Južne železnice v graškem predmestju Maribora, ki so že od ustanovitve leta 1863 zaposlovale nad tisoč ljudi, vendar Tesle ali Druškoviča ni bilo med njimi.¹⁹⁹ Urno rastoče delavsko naselje je gotovo prišlo prav kvartopircu Tesli. Septembra 1868 so Mariborski delavci ustanovili svoje izobraževalno društvo s knjižnico pod vodstvom Franza Wiesthalera (* 1825; † 1890), ki je postal ob letu obsorej urednik *Marburg Zeitung* in ga je znova urejeval med letoma 1882–1887. Sledil je liberalnim domislicam Pomladi narodov iz leta 1848; seveda ni podprl Združene Slovenje, ki bi ga kot spodnještajerskega Nemca spravila v neljubo manjšino.²⁰⁰

Tesla bi lahko delal za majhno podjetje, kot je bilo Denclovo ali Kagerjevo, ali pa za velikega, kot so bile delavnice Južne železnice blizu Teslove priljubljene gostilne v graškem predmestju.²⁰¹ Delavnice so v Teslovi dobi že zaposlovale nad tisoč delavcev, ki so živeli v štiridesetih novih delavniških hišah s 724 stanovani, zgrajenimi leta 1863 in 1868 na desni obali Drave zunaj tedanjega Maribora kot največji urbani kompleks v deželi. Zaposleni so uporabljali pritikline delavnic vključno z otroškimi vrtcem, šolo, trgovino in dvema kopalščema.²⁰²

Tesla je bil dejansko izgnan kot potepuh; bržkone je spal neprijavljen v mariborskem graškem predmestju, morda v enem od 724 delavskih stanovanj. Izgnanec ni imel redne službe: lahkoživo se je preživljal s kvartopirskimi ali biljardnimi dobički, dokler ga ni kateri od jeznih izgublajočih družabnikov prijavil oblastem, če tega ni storil kar Murko ali celo Teslov oče. Maribor tistih dni in še posebej njegovo graško predmestje se je naglo polnilo z razmeroma izobraženim delavstvom s severa, ki so ponujali prvovrstne dobičkonosne priložnosti izkušenemu šahistu, kvartopircu »ajnca« ali morda celo taroka. Slednji se je igral

¹⁹² Leskovec, 1991, 345, 347; Baš, 1934, 33

¹⁹³ Cverava, 2006, 40; Jurik, 1884

¹⁹⁴ *Marburger Zeitung*, 1. 1. 1879, str. 5

¹⁹⁵ *Marburger Zeitung*, 4. 3. 1879, str. 3

¹⁹⁶ www.ebooksread.com/authors-eng/great-britain-commissioners-of-patents/the-commissioners-of-patents-journal-aer/page-12-the-commissioners-of-patents-journal-aer.shtml, ogled 13. 3. 2013

¹⁹⁷ Hartman, 2009, 161, 187

¹⁹⁸ Šamperl Purg, 2001, 656–658

¹⁹⁹ Rozman, 1979, 20, 27; SI_PAM/0973, Matične knjige delavcev 1860–1990

²⁰⁰ Rozman, 1979, 29, 84–85; Hartman, 2001, 594–595

²⁰¹ V zadnjih treh desetletjih Habsburške monarhije je mariborski Magistrat zbiral seznam svojih manufaktur (Leskovec, 1991, 332).

²⁰² Ifko, 2012, 66–67



Slika 4: Teslova kvartopirska gostilna pri Veselem kmetu v Mariboru

med Čehi, Avstrijci in Slovenci, vprašanje pa je, koliko je zašel v Karlovac ali celo med Ličane.

Tesla je živel v mariborskem graškem predmestju blizu kolodvora na Tegetthofstrasse (Tegetthoff); pred letom 1866 je bila to Graška ulica (Gratzergasse), med obema vojnoma Aleksandrova ulica,²⁰³ po letu 1945 pa Partizanska cesta. Ni imel uradnega domicila na Tegetthofstrasse, navadno pa je karte igral v gostilni Veseli Kmet, po Kulišičevi pripovedi v gostilni »Tegethof« imenovani po cesti, posvečeni v Mariboru rojenemu admiralu. Tam je Kulišič slučajno naletel na Teslo januarja 1879, medtem ko je čakal na povratni vlak; sloviti izumitelj je kartal piket (Piquet) z dvema znancema. V Mariboru se je zaman potegoval za službo predavatelja zemljepisa in italijanščine na zasebni trgovski šoli pri ravnatelju Petru Reschu († po 1909), ki je dal oglas v časopis *Tagespost*.

Resch je v mariborskih srednjih šolah resda še vedno vpeljeval plinsko razsvetljavo učilnic,²⁰⁴ leta 1903 pa je kot direktor Javne trgovske šole v Bolzanu in pomemben pisec pravnških knjig deloval v ligi proti dvoboju.²⁰⁵ Resch je Kulišiču plačal potne stroške in ga je drugo jutro pospremil na postajo. Ker sta bila prezdognja, sta zavila po okrepčilo v gostilno Veseli kmet, po domače »Vlahovič«, na vogalu danes Partizanske in Mlinske ulice nasproti kavarne Jadran, pozneje Jeklotehna. Leta 1985 so jo uničili zaradi nove avtobusne postaje,²⁰⁶ zaradi česar se je Tesla

nedvomno obrnil v grobu. Gostilna Veseli kmet je bila majhna stavba zraven velike Vlahovičeve hiše s trgovino in apoteko v vogalu Meljske in Partizanske ceste; druga gostilna Prlek je bila na Meljski cesti, prvo poslopje na levi strani za železniškim mostom.

Zgodaj marca 1879 je po dolgotrajnem iskanju v Maribor prišel Teslov oče Milutin, da bi nagovoril zabljenega sina k vrnitvi domov in nadaljevanju študija v Pragi jeseni 1879. Tiste dni se je v Mariboru močno bliskalo s požari vred, Tesla pa je očeta zavrnil, čeprav je Milutin spoznal celo Teslov ugled v mariborski službi.²⁰⁷ Oče Milutin ali kdo drug je takoj nato prijavil Teslo mestnim oblastem; policija je vdrla v Tegetthofstrasse neznane številke, kjer je neprijavljen bival izumitelj.²⁰⁸

V tistem času je bil mariborski župan nečak nekdanjega župana Otmarja Reiserja, član Štajerskega naravoslovnega društva in liberalni notar Matej Reiser (Matevž, * 1830 Weilersbach v Badnu; † 1895) med letoma 1870–1882.²⁰⁹ Podžupan je bil lekarnar Franc Stampfl²¹⁰ in nato odvetnik dr. Ferdinand Duchach (Duhač, † 1887), Reiserjev poznejši naslednik na položaju župana. Duhača je nasledil inženir Aleksander Nagy, ki bi bil vsaj poklicno bližje Tesli. Kot preglednik računov je v času Teslovega mariborskega zapleta deloval okrajni glavar Nemeč Julius Seeder.

Po letu 1850 je mariborska mestna uprava (magistrat) opravljala še naloge političnega okraja. Dne 8. 3. 1879 je uradnik mariborskih mestnih oblasti Oldrich Taube (Ulrih Golob, Glušec) je po policijski obtožbi podpisal ukaz za Teslov izgon, straža pa je pospremila Teslo do njegovega domačega mesta Gospić. Bržkone je bil Tesla v soboto in naslednji dan priprt, njegov sotrpina za rešetkami Anton Klaus, doma južno od Ljubljane ali iz Škofje Loke, pa je bil izročen ljubljanskim oblastem. Tesla in Anton Klaus sta bila zaradi podobnega prekrška deportirana v Gospić oziroma Ljubljano. Tisti čas je bil dostop s karlovške strani omejen zaradi živinske kuge. Mariborsko moško kaznilnico so začeli zidati komaj po Teslovem odhodu leta 1884.

Tisti čas v Ljubljani ni bilo nikogar s priimkom Klaus, nekoliko pozneje pa najdemo številne Klavse in Klause rokodelce, rojene v okolici Bele Cerkve, Ribnice, Velikih Lašč ali Turjaka z izjemo na Dunaju rojenega arhitekta Karla Klause (* 27. 1. 1889).²¹¹ Mariborski okrajni sodnik je bil tisti čas Alojzij Čeh

²⁰³ Leskovec, 1991, 365

²⁰⁴ *Marburger Zeitung*, 8. 11. 1876, letnik 15, številka 133; Kulišič, 1931, 10

²⁰⁵ Resch, 1885; forum.ahnenforschung.net/archive/index.php/t-19011.html, ogled 20. 2. 1012

²⁰⁶ Mrkić, 2004, 35–36, 38; Kulišič, 1936, 14; Marinčič, 2006, 40; Cverava, 2006, 40

²⁰⁷ *Marburger Zeitung*, 2. 3. 1879 str. 3; Cverava, 2006, 41

²⁰⁸ Mrkić, 2004, 36

²⁰⁹ Podgoršek, 2006, 366–367; Leskovec, 1991, 271

²¹⁰ *Marburger Zeitung*, 28. 2. 1879 str. 2

²¹¹ SI_LJU 500, Domovinski oddelek, mikrofilma 403 in 567

(Tschech), ki je takoj po Teslovem pregonu odšel za deželnega sodniškega svetovalca v Ljubljano.²¹²

Leta 1869 je imela mariborska mestna uprava 29 uslužbencev skupaj s predstojnikom urada, osmimi uradniki, stražmojstrom in enajstimi policisti, med katerimi je bil tudi nadzornik zopora. Leta 1875 so občinski urad (magistrat) vodili župan, namestnik, štirje mestni svetovalci, izvoljeni med občinskimi svetovalci, predstojnik urada, 18 uradnikov in pomožnih uradnikov, litograf, sluga ter slugov pomočnik. Leta 1900 je Maribor imel že 55 policistov.²¹³

Oblasti so iz Gospića pod številko 7019 odpisale kolegom v Maribor, da je nebodigatreba Tesla prispel 17. 3. 1879; sramoten postopek je bil zaključen 24. 3. 1879. Tesla je bil izgnan iz Maribora kot potepuh po odloku uprave na posredovanje mariborskega urada, ustanovljenega tri leta prej.²¹⁴

Mariborski Magistrat je bil nadvse strog pri tovrstnih novih nalogah, ki se jih še ni naveličal. Tako je v letu 1878 mestna varnostna policija (Städtische Sicherheitspolizei zu Marburg) v Mariboru aretirala 1740 izgreznikov. 131 osebi je izgnala, 555 oseb je transportirala v njihove domače kraje tako kot Teslo, 243 so jih kaznovali v njihovih domačih okrožjih in niso bili všteti med 1740 kaznovane, 767 pripornikov je izpustila z ukorom po nekajurnem policijskem priprtju, 287 pa so jih izročili kazenskemu sodišču. Glavna mariborska postaja za izgone je prevzela 1165 od drugod izgnanih oseb za nadaljnji transport in jih je vse odpeljala naprej.²¹⁵ Leta 1879 so v Mariboru prevzeli 1335 oseb in jih gnali dalje, kar je bilo za 170 več kot leto pred tem.²¹⁶

V Teslovem času je bil za namestnika župana znova izvoljen Stampfl, štirje mestni svetovalci pa so bili Johann Girstmayr, Marco, Ludwig Bitterl von Tessenberg in dr. Josef Schmiderer (Schmiederer), predsednik mariborskega filharmoničnega društva, poslanec državnega zbora in deželnega sveta. Za finančno področje sta bila izbrana veleposestnik Kokoschinegg iz Čebelarske ulice št. 18 in milar Franz Bindlechner (* 1820; † 1897) iz Gosposke ulice št. 13. Bindlechner je bil član načelstva mariborske posojilnice, cerkveni ključar stolne cerkve in kandidat slovenske klerikalne stranke.²¹⁷ V kontrolno komisijo

za plinsko razsvetljavo so bili izvoljeni Wiesinger, predsednik gostilničar Johann Girstmayr (Girstmajer) z Graške danes Vetrinjske ulice št. 12, dr. Lorber, knjižničar Obrtnega društva, ustanovljenega 16. 1. 1882, Karl Flucher (Fluch) in Franz Bindlechner.²¹⁸ Tik pred Teslovo obsodbo je dotedanji adjunkt mariborskega okrožnega sodišča dr. Alois Banmann prevzel enako dolžnost v Murecku (Cmurek).²¹⁹

Pri tako številnih izgonih se mestni veljaki niso imeli časa ukvarjati s Teslovo nadarjenostjo; bolj jih je zanimala tožba lastnika Fal pri Rušah barona Maxa Rasta proti razžalitvi časti v ptujskem tisku,²²⁰ predvsem pa izgubljena tožba direktorja učiteljskega dr. Antona Elschnigga (Elschnig, Elšnik) proti ravnatelju dekliške šole Alojzu Habianitschu (Habjanič) zaradi kršenja telesne nedotakljivosti ob obrambi pred napadom s stolom v Habjaničevi lastni pisarni. Pravda pri mariborskem okrožnem sodišču na levem bregu Drave v sredo, 5. 3. 1879, med 15. uro in 18.30 ob obrambi graškega odvetnika dr. Kosjeka je potekala pred tako nabito polno dvorano, da so jo morali zakleniti; Elšnik se je zastopal sam. Obravnavo je vodil sodni adjunkt K. Nadamlenzki, sodni adjunkt dr. Franc Voušek (Vouschek) pa je predstavljal državno javno tožilstvo. Med pričami so bili župan mestni šolski svetnik Reiser, mestni svetovalec Marco, dr. Schmiderer, direktor Frank, Stampfl, Arthur Mally, telovadni učitelj, vadbene načelnik in knjižničar velikonemškega Turnvereina Rudolf Markl (Markel), šolski sluga (Schuldienner) Stracher, kramar (Greisler) Leth in učiteljica dekliške šole Matzenauer.

V soboto, 25. 1., ob 15. uri, ko je potekal le pouk francoščine, je Elšnik kot šolski inšpektor Maribora vstopil v Habjaničevo pisarno in zahteval dnevnik; Habjanič ga ni dal in ga je ozmerjal z lažnivcem in podobno, nakar je Elšnik zagrabil stol. Spor se je razplamtel zaradi Elšnikove hčerke učiteljice v Habjaničevi šoli, ki naj bi kljub bolniški drsala na ledu.

Naslednji dan je deželni šolski inšpektor dr. Roschek v Gradcu ugotovil črnavko na Elšnikovem obrazu, ki jo je 3. 2. zdravil Arthur Mally, poznejši pisec knjige o mariborskih ulicah. Elšnik je odstopil s položaja inšpektorja do izreka sodbe oziroma ga je župan odstavil, čeprav ga je nastavilo ministrstvo.

²¹² *Slovenski gospodar* (Maribor: Pajk), 13. 3. 1879, 13/11; *Marburger Zeitung*, 9. 3. 1879 18/30: 3

²¹³ Hartman, 1983, 128; Hartman, 2001, 201; Leskovec, 1983, 169, 175; Leskovec, 1991, 259, 267; SI_PAM/0005, Mestni računski knjigi za leti 1869 in 1900

²¹⁴ Zapis o njem pravi: Tesla Nicolaus / preselitev // 2160, 2675// (Pod deportacijskim dokumentom je opis tlakovanje ceste Tagethofstrasse) // 2160 / p / 8/3 / Glede Nikolausa Tesle, zaradi dela deportiranega / je prisilno v Gospić transportiran, kjer so posel prevzeli žandarji urada Gospić // (Naslednji dopis št. 2161) // 2575 / H/ 24. III // Gospić Pomožni sodniški urad) / 17. 4. / številka 7019 // Prislilna vrnitev pod št. 2160 za Nikolo Teslo // (naslednji dopis št. 1331: 24. 3. / 21. 3. / številka 1331); Cverava, 2006, 41.

²¹⁵ *Marburger Zeitung*, 5. 1. 1879, str. 2

²¹⁶ *Marburger Zeitung*, 4. 3. 1880 str. 3

²¹⁷ *Domovina* (Celje), 29. 1. 1897. 7/5: 4

²¹⁸ *Marburger Zeitung*, 5. 1. 1879, str. 2–3; Hartman, 2009, 89, 116, 190, 274

²¹⁹ *Marburger Zeitung*, 19. 1. 1879 18/9: 3; *Slovenski gospodar*, 23. 1. 1879, 13/4: 32

²²⁰ *Slovenski gospodar*, 30. 1. 1879, 13/5: 39

Sodišče je Elšnikovo tožbo zavrnilo, tako da je moral plačati 10 fl v krajevni šolski fond, občinstvo pa je Habjaničevo oprostitev, utemeljeno s samoobrambo, pozdravilo z »Bravo!«.²²¹

Habjanič je bil že leta 1869 direktor mariborske dekliške šole,²²² medtem ko je bil Anton Elšnik (* 1827 Sv. Jurij (St. Georg) Slovenske Gorice) med letoma 1861–1865 profesor na tržaški gimnaziji in nato leta 1869 na realki v Salzburgu, preden je postal ravnatelj mariborskega učiteljskega doma.²²³ Elšnik je bil v 3. gramatikalnem razredu mariborske gimnazije leta 1839/40 prvi nagrajenec (premier), medtem ko je bil poznejši admiral Tegetthoff (* 23. 12. 1827) med njemu najbližjimi pohvaljenimi (his proxime). Elšnik in Antonie Braun sta imela mlajšega sina Antona Elschniga (* 22. 8. 1863 Lipnica (Leibnitz) na Štajerskem; † 1939), ki je po študiju v Gradcu postal vodilni očesni zdravnik – oftalmolog.

Teslo so oblastniki izgnali takoj po pustu; v tistem času je v Mariboru do 16. 2. 1879 v Teslovi soseščini na Tegetthoffstrasse št. 21 gostoval Veltéejev panoptikum z gibljivimi projekcijami tujerodnih živali.²²⁴ Louis Veltée iz Lyona bratov Lumière je bil skupaj s svojima otrokoma in vnukom začetnik dunajskega kina in je 26. 8. 1896 v središču Dunaja odprl muzej voščenih lutk s stalnim panoptikumom.



Slika 5: Poslovljni dan Veltéejevega panoptikuma na mariborski Tegetthoffstrasse št. 21 s popustom dne 16. 2. 1879, kar gotovo ni minilo brez soseda Tesle (*Marburger Zeitung* 20. 2. 1879 str. 3).

²²¹ *Marburger Zeitung*, 2. 3. 1879, str. 3; *Marburger Zeitung*, 7. 3. 1879, str. 2–3; *Slovenski gospodar*, 6. 2. 1879, 13/6: 44; *Slovenski gospodar*, 20. 2. 1879, 13/8: 60; *Slovenski gospodar*, 6. 3. 1879, 13/10: 79; Cverava, 2006, 41; Hartman, 2009, 271

²²² *Zeit. Gymn.*, 1869

²²³ *Verhandlungen der kaiserlich-königlichen zoologisch-botanischen Gesellschaft in Wien*. Herausgegeben von der Gesellschaft. XV. Band. Wien, 1865; Elschnig, 1861; Elschnig, 1869

²²⁴ *Marburger Zeitung*, 26. 1. 1879, str. 4

Keine Kerze mehr!

Petroleum-Sparkkerze in Kerzenform, womit man um $\frac{1}{2}$ Aemter Petroleum das größte Lokal 10 Stunden brillant beleuchten kann. 1 Stück aus Metall 30 fr., aus Porzellan 40 fr.

Elektrische Bändmaschine in der Größe eines kleinen Telegraf-Apparates, höchst elegant ausgestattet, aus Ebenholz mit Bronze verziert, eine Bieder für den elegantesten Salon. Mit einem Finger die Batterie berührt und es entzündet sich das dabei stehende Lämpchen, wo man im Nu Licht hat und ist selbes, da jede Gefahr ausgeschlossen ist, der leichten Handhabung und der staunenden Billigkeit halber für Reich und Arm bestens zu empfehlen, besonders für Raucher, Krankenzimmer etc. Preis per Apparat fl. 4.50.

Licht in der Westentasche.

Eine auf der Ausstellung in Paris 1878 prämierte Erfindung, welche es Jedermann ermöglicht die größten Entfernungen auf freiem Felde tagsüber zu beleuchten. Diese Laterne kostet lairt fl. 1.50, feiner aus Nickel mit Feuerzug und Sprungwert fl. 3 bis fl. 4. (198)

Das Bündhölzchen hat sich überlebt!

Elektrische Selbstzünd-Feuerzeuge, womit man im größten Sturm Feuer machen kann. Der ganze Apparat ist in der Größe einer Pliege und kostet 1 Stück 10 fr. feiner mit Uhrwerk aus echtem Nickel, nie abzumähen, 1 Stück fl. 1.50 bis fl. 2.50.

Salon-Feuerwerk, geruch- und gefahrlos, 1 Karton, enthält 12erlei verschiedene effektvolle Zimmerfeuerwerke, Jedes anders, sammt Belehrung. Der ganze Karton 95 fr.

Elektrische Sonne, ganz neu; gibt ein elektrisches Tageslicht, das höchste was bis jetzt in Beleuchtung erfunden wurde. Die stärksten 50 Gasflammen werden verdrängt, wenn dieses Licht angezündet wird; sehr empfehlenswert für Kränzen, Bälle, besonders beim Cotillon-Tanz zu verwenden und kostet 1 Stück fl. 3.50, größere fl. 5 bis fl. 8.50.

Der Hausfreund. Ein sehr verwendbares Instrument für jede Haushaltung, erfüllt 14 verschiedene Zwecke, als: Hammer, Säge, Hebel etc. per Stück 75 fr., so auch die neuesten **Pipen-Körbe**, auf jede Flasche zu verwenden. Um die Flasche zu entleeren braucht man nur den Hahn zu öffnen. 1 Stück 45 fr.

Amal-Bouquons in größter Auswahl, enthaltend Kantenlappen, komische Anzüge, Thierköpfe etc. etc. zu den billigsten Preisen von 8 fr. angefangen bis 80 fr.

Bouquet-Fächer, ganz neu; selbes stellt ein prachtvolles Bouquet vor, mit den feinsten und schönsten Blumen ausgestattet, die beinahe von den echten nicht zu unterscheiden sind, und erscheint auf Wunsch ein Fächer daraus; für den Friseur das Praktischste und Bequemste, was es geben kann. Selbes ist der Billigkeit halber und da es ganz neu ist, für jede Dame bestens zu empfehlen. 1 Stück feinerer Sorte fl. 1.50 bis fl. 2.50, feinste fl. 3 bis fl. 5.

Auch sind sämtliche **Hander-Apparate** und **Jur-Gegenstände** in größter und reichhaltiger Auswahl stets am Lager und sind selbe für Lombolas und Jur-Batterien bestens zu empfehlen. Zusammenstellungen zu 50, 100 bis 500 Stück, fortirt, kosten nur fl. 2.50, fl. 5.50 bis fl. 50 die feinsten.

Allein zu haben im

Fabriks-Depot der neuen Erfindungen
Magazin-Lokal: Wien, Praterstraße 16.

Slika 6: Reklama za električni vžigalnik, svetilko in podobne vakuumske naprave, nagrajene na Pariški svetovni razstavi leta 1878 le dan pred Teslovim prijetjem (*Marburger Zeitung* 7. 3. 1879, str. 4).

V mariborskem Kazinu se je igrala družinska tombola,²²⁵ Wiesthaler pa je svoje bralce vodilnega nemškega glasila obveščal o zapletih po okupaciji Bosne, pripravah na srebrno poroko cesarskega para, slavljenost dne 24. 4. 1879, bojnih za dunajsko oblast med knezom Turjaškim, Taaffejem in grofom Hohentwartom²²⁶ ter pripravljanju spomenika mariborskemu admiralu Tegetthoffu,²²⁷ katerega odkritje je počastil sam cesar leta 1883. Poročal je o bremenski razlagi starosti Zemlje²²⁸ Emila du Bois-Reymonda (* 1818; † 1896), o ulicah San Francisca kot prvih osvetljenih z elektriko na svetu in o razsvetljavi čitalnice Britanskega muzeja v Londonu.²²⁹ Wiesthaler je oglaševal mariborskega fotografa Henricha Krappeka, električni vžigalnik, svetilko in podobne naprave, nagrajene na Pariški svetovni razstavi leta 1878,²³⁰ posmehljiva usoda pa je dunajskega predavatelja profesorja G. Egestreša povabila predavati in eksperimentirati z Edisonovim fonografom v kemijsko učilnico mariborske realke 21. 3. 1879 ob 18. uri ob vstopnini 30 kr tik po Teslovem izgonu.²³¹

Žal danes v Pokrajinskem arhivu Maribor hranijo zgolj navedbe Teslovih dokumentov s številkami 2160 »p« izpod peresa Oldricha Taubeja,²³² številka 2675 »H« in 7019 za Teslo in 2659 za Klauza, samih dokumentov pa ne. Štajerski deželni arhiv v Gradcu prav tako ne hrani policijskih dokumentov o tedanjih mariborskih izgonih. Kakor koli že, Nikolov oče Milutin je tisto zimo zbolel in umrl 17./30. 4. 1879 brez sina Nikole ob vzglavju.²³³

7 TESLA V PRAGI

Po sramotnem izgonu iz Maribora je Tesla nekaj časa pomagal poučevati na nižji realci v Gospiću, kjer je dijaške klopi zapustil devet let prej. Mesto suplenta za naravoslovje in fiziko v nemškem ali srbohrvaškem jeziku na nižji realci v Gospiću je po potrditvi graške komisije leta 1878/1879 zasedal Teslov gospiški sošolec srbski riboslovec Mojo Medić (Mojsije, * 18. 10. 1855 Ličko Dobroselo vzhodno od Gospića; † 1939 Zemun) po končanem študiju naravoslovja in kemije na dunajski tehniški visoki šoli. Jeseni 1879 je Mojo odšel iz

Name und Stellung	Lehrfach	Unterrichtssprache
Fiumi Johann, Ritter von, Supplent an der Staats-Realschule in Roveredo	Chemie für Ober-, Physik für Unterrealschulen	italienisch
Fleischer Gustav, Supplent am Realgymnasium in Belovar	detto	serbo-croat.
Garzarolli Karl, Edler von Thurnlack, Assistent an der Universität in Graz	detto	deutsch
Gödel Josef, Lehramtsandidat in Graz	Chemie und Physik für Unterrealschulen	detto
Schubert Stanislaus, Assistent an der technischen Hochschule in Brünn	Chemie für Ober-, Naturgeschichte für Unterrealschulen	detto
Smolka Alois, Lehramtsandidat in Prödlitz	detto	detto
Postl Adolf, Lehramtsandidat in Graz	Chemie und Naturgeschichte für Unterrealschulen	detto
Kraszny Franz, Supplent am Staatsgymnasium in Landskron	Naturgeschichte für Ober-, Physik für Unterrealschulen	detto
Medić Mojo, Supplent an der Unterrealschule in Gospić	Naturgeschichte und Physik für Unterrealschulen	deutsch und serbo-croat.
Sikula Anton, Lehrer an der Bürgerschule in Hohenelbe	detto	deutsch

Der Minister für Cultus und Unterricht hat das **Öffentlichkeitsrecht** ertheilt:
der Privat-Mädchen-Volksschule der Natalie **Kalmann** in Wien,
(Ministerial-Erlass vom 17. Juli 1879. Z. 10738.)

Slika 7: Nastavitev Mojo Medića za suplenta fizike v Gospiću leta 1878/79 (Verordnungsblatt für den Dienstbereich des K. K. Ministeriums für Kultus und Unterricht. Jahrgang 1880. Wien: Staatsdruckerei, 336).

Gospića, faliranega študenta Teslo pa seveda niso uradno nastavili, temveč je zgolj nadomeščal pri verouku po očetovi smrti aprila 1879. Medić je prvega in drugega junija 1892 srečal Teslo med njegovim kratkim obiskom v Beogradu, leta 1921 pa je postal ravnatelj realke v Rumi; s Teslo si je dopisoval med obema vojnoma tako kot Teslov graški sošolec Anton Zorić.²³⁴

Učiteljevanje je bilo Teslov cilj med graškimi študiji, vendar je čedalje bolj sanjal o izumiteljstvu. Verjetno je izpolnil obljubo ali vsaj željo svojega očeta, ko je poskusil končati študij na politehniko v Pragi v poletnem semestru januarja 1880.²³⁵ V Mariboru je morda kaj prihranil za študij v Pragi, ki pa se ga ni resneje lotil. Seveda mu je obilo denarja primaknila še mati, precej več pa Dane Branković skupaj z drugima

²²⁵ Marburger Zeitung, 23. 3. 1879, str. 2

²²⁶ Marburger Zeitung, 14. 2. 1879, str. 3

²²⁷ Marburger Zeitung, 9. 3. 1879, 18/30: 2

²²⁸ Marburger Zeitung, 5. 1. 1879, str. 2

²²⁹ Marburger Zeitung, 14. 2. 1879, str. 2

²³⁰ Marburger Zeitung, 7. 3. 1879, str. 4; Marburger Zeitung, 16. 3. 1879, str. 3

²³¹ Marburger Zeitung, 21. 3. 1879, str. 2

²³² Taubeja navala le Pištalo (2009, 77; 2012, 83).

²³³ Mrkić, 2004, 36–37, 39; SI_PAM/0005 A.138 Občine, Mestna občina Maribor Geschaefts Protokoll 1879 no. 2160, 8. 3. 1879, in no. 2675, 24. 3. 1879; Jovanović, 2001, 51–52; Detela, 2013, 130

²³⁴ Verordnungsblatt für den Dienstbereich des K. K. Ministeriums für Kultus und Unterricht. Jahrgang 1880. Wien: Staatsdruckerei, 336; [www.novosti.rs/dodatni_sadrzaj/clanci.119.html:280070-Nikola-nece-mantiju; gimnazija-gospic.skole.hr/upload/gimnazija-gospic/newsattach/32/Skolski_plan_-_2011_12.pdf](http://www.novosti.rs/dodatni_sadrzaj/clanci.119.html:280070-Nikola-nece-mantiju;gimnazija-gospic.skole.hr/upload/gimnazija-gospic/newsattach/32/Skolski_plan_-_2011_12.pdf), str. 2; www.novosti.rs/dodatni_sadrzaj/clanci.119.html:280072-Tumac-i-cuvar-vere, ogledi 26. 2. 2013;

Jovanović, 2001, 49–50

²³⁵ Cverava, 2006, 43–45

dvema ujcema. Dodatke je navrglo vmesno poučevanje v Gospiću, še več pa umetelno igranje biljarda v Zlati Pragi, s katerim se je Tesla pozneje hvalil med ameriškimi intervjuji.

Leta 1881 so začeli uvajati praško električno javno razsvetljavo in prve telefonske priključke,²³⁶ kar se Tesli gotovo ni zdelo od muh. Kljub temu Tesla nikoli ni plačal praške šolske pristojbine ali opravljal izpitov, vpisal pa je dve matematični predavanji v nemščini in filozofska Stumpfova predavanja o Davidu Humu.

Pri profesorju Karlu Domalipu (* 1846; † 1909) je napovedal obiskovanje predavanj eksperimentalne fizike, ki so se odvijala v češčini v času, preden se je praška univerza razdelila na nemški in češki del leta 1882. Podobno razpolovitev so si na praški politehniko privoščili že leta 1869. Leta 1867/68 je bil Domalip študent prvega letnika pri Ernstu Machu, takoj potem, ko je Mach prišel iz Gradca v Prago; Domalipov sošolec je bil poznejši zagrebški profesor Vincenz (Čeněk) Dvořák. Leta 1877 je Domalip postal privatni docent ob Machovi podpori, pozneje pa je bil obenem prvi asistent Adalberta Karla Waltenhofena (* 1828; † 1914) na praški nemški tehniški univerzi. V zimskem semestru 1879/80 privatni docent Domalip ni predaval le eksperimentalne fizike (*Electricitätslehre*) in vaj (*Übungen in der Experimentalphysik*), temveč je pod Machovim vplivom poučeval tudi zgodovino elektrike pod nemškim naslovom *Electricitätstehre in ihrer historischen Entwicklung*; Tesla žal ni vpisal tega tečaja.

Med Teslovim obiskom Prage je bil Mach tam prvič rektor, vendar Tesla ni vpisal njegove vsako-

dnevne ure pouka *Experimentalphysik*, prav tako pa ne vsakotedenskih enournih javnih predavanj *Theoretische Ergänzungen zur Experimentalphysik*. Tesla pa je morda poslušal Machovo poljudno predavanje v fizikalni predavalnici v okviru »Lotus Union« 17. 2. 1880 pod naslovom *Über die Theorie des Radiometers und ein an die Radiometeranordnung anknüpfender Versuch*,²³⁷ ki mu je gotovo koristilo pri poznejših vakuumskih poskusih s Crookesovim radiometrom.

Domalip je začel predavati elektrotehniko kot profesor komaj po razpolovitvi univerze leta 1884/85, leta 1893 pa je prevzel novoustanovljeno katedro za elektrotehniko na praški češki tehniški univerzi. Januarja 1896 je Domalip postavil prve poskuse z novo odkritimi rentgenskimi žarki, s katerimi se je ukvarjal tudi Tesla. Največ je objavljial v domači praški reviji za matematiko in fiziko. Objavil je več knjig in učbenik elektrotehnike, pri nekaterih tekstih pa mu je pomagal František Koláček (* 1851; † 1913). Tesla se je v Pragi spoprijateljil tudi s profesorjem politehnike elektrotehnikom Sakulko, poznejšim rektorjem dunajske politehnike.²³⁸

Tabela 1: Praška predavanja, za katera se je Tesla prijavil, ne da bi kdaj opravil izpite²³⁹

Predavanje	Število tedenskih ur	Profesor
Analytische Geometrie des Raumes	2	Durege
Cviceni v experimentální fysike	2	Domalip
Zahlenlotterie	2	Puchta
Über David Hume's »Untersuchung des menschlichen Verstandes«	1	Stumpf

Slika 8: Seznam praških predavanj, ki si jih je Tesla želel poslušati kot 38. slušatelj po vrsti, stanujoč Ve Smečkách (Smechl-gasse) številka 13 (Arhiv Univerze v Pragi, Glavna knjiga slušateljev filozofije v poletnem semestru 1880; Mayer, 1996, VI/68)

²³⁶ Cverava, 2006, 46

²³⁷ Těšínská, www.muni.cz/press/books/files/mach75.pdf, ogled 20. 1. 2013

²³⁸ Mircevski, Cundev, Andonov, 2007, 21; Kulišić, 1936, 13

²³⁹ Pichler, 2004, 4; Marinčić, 2006, 41



Slika 9: Teslov praški profesor matematike Heinrich Durege

Heinrich Durege (Durège, * 1821; † 1893) je prišel v Prago leta 1864 iz Züricha; najprej na politehniški institut in nato leta 1869 na univerzo. V zimskem semestru 1879/80 je Durège predaval Diferencialni in integralni račun, krivulje v prostoru, krive ploskve in matematične vaje. V poletnem semestru 1880 je predsedal na drugo stopnjo Diferencialnega in integralnega računa, obenem pa je predaval še Analitično geometrijo prostora, ki naj bi jo poslušal Tesla po dve uri na teden.

Privatni docent Anton Puchta (* 1851; † 1903) je predaval o eliptičnih funkcijah pozimi 1879/80, nato pa o teoriji števil in funkcijah ene kompleksne spremenljivke; prvo od obojega je Tesla nameraval poslušati po dve uri na teden. Leta 1887 so Puchti ponudili katedro v danes ukrajinskih Czernowitzah (Чернівці/Tscherniwzi/Černivci); izjemoma so tako počastili izrednega profesorja z druge univerze. Predvsem je razvijal postopke računanja ukrivljenih ploskev, ukrajinsko katedro pa je obdržal do smrti. Njegov tamkajšnji naslednik je bil Robert Sterneck (* 1871; † 1928); Sternecka je zamenjal Blejec Josip Plemelj (* 1873; † 1967), ki je začel dunajske študije pri Boltzmannu, Gegenbauerju in Escherichu.

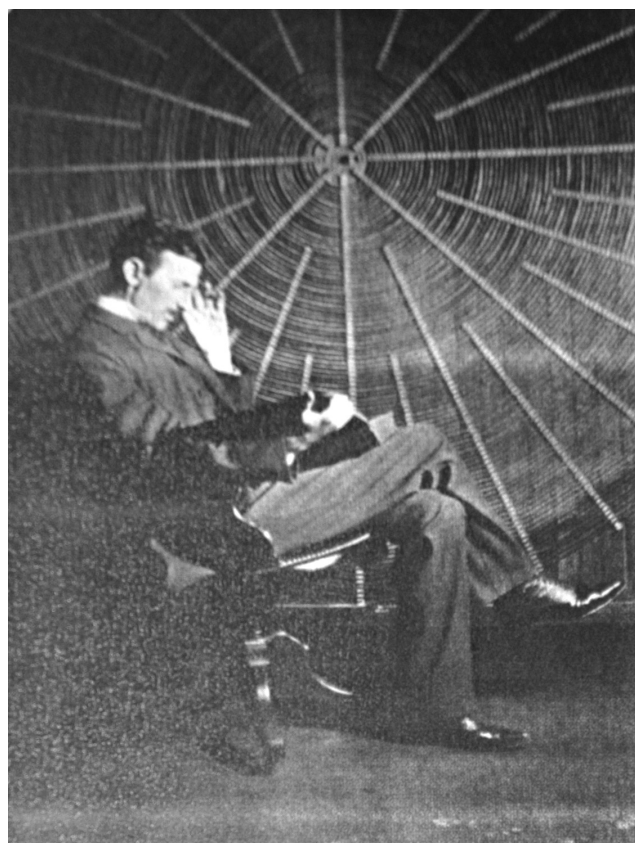
Carl Stumpf (* 1848; † 1936) je bil nemški filozof in psiholog pod vplivom Franza Brentana in Hermanna Lotza. Usmeril je fenomenologijo 20. stoletja, vključno z Edmundom Husserlom; brali so ga Max Wertheimer, Wolfgang Köhler ali Kurt Koffka. Med letoma 1879–1884 je predaval na praški univerzi, ob delitvi na nemški in češki del pa je bil med letoma 1883–1884 dekan praške nemške filozofske fakultete.

Zasnoval je fiziologijo tonov,²⁴⁰ primerjalno in etnomuzikologijo. Ko je praški inženir trdil, da je izumil napravo za spreminjanje fotografij zvočnih valov v zvok, si je Stumpf ogledal demonstracijo; jezno je sestavil uničujočo kritiko tega čudnega prednika Edisonovega gramofona. Bog ve, ali niso podobni dogodki zvalili Teslo na predavanja Stumpfa, ki je filozofijo pozneje poučeval na univerzah Göttingen, Würzburg, München in Halle, dokler ga niso počastili s prestižno profesuro v Berlinu.

7.1 Tesla in Bošković

Vsi poznamo priljubljeno Teslovo fotografijo, ko bere v Faradayevi kletki, na katero švigajo strele. Vendar se je šele nedavno ugotovilo, da na podobni sliki prebira – Boškovićevo Teorijo filozofije narave.²⁴¹ Vsekakor je ravno Sekulić Teslo navdušil za Boškovića, saj je tudi sam zagovarjal Boškovićevo fiziko z eno samo silo.

Seveda pa je bil obstoj obeh nasprotujočih si sil v molekuli po objavi R. Clausiusovega virialnega teorema leta 1870 že dokaj nedvomen, čeprav sta npr.



Slika 10: Tesla bere Boškovićevo Teorijo v New Yorku pred svojim laboratorijskim spiralnim sekundarnim navitjem visokofrekvenčnega transformatorja.

²⁴⁰ Mayer, 1996, VI/68

²⁴¹ Zorić, 2010, 10; Civrić, 2011, 51

Lavtar (1873) in Sekulić (1874) še vedno poskušala izpeljati odboj zgolj iz privlaka. Na podobno možnost se je bržkone zanašal tudi Robida leta 1865 v svoji obrambi Šubica pred Krönigovo kritiko. August Karl Krönig je kot primer za svojo nasprotno teorijo izbral Šubica. Prebral je le uvod in prvo poglavje Šubičeve knjige, saj so mu trdovratne bolečine v očeh že skoraj tri leta onemogočale branje.²⁴² Krönig je napisal kritiko 24. 2. 1864, poldrugo leto po izidu Šubičeve knjige poleti 1862. Šubic se mu je zdel podoben Lavtarju (1873) ali Sekuliću (1874), ki sta skušala vse fizikalne pojave izpeljati iz učinkov ene same težnostne sile.

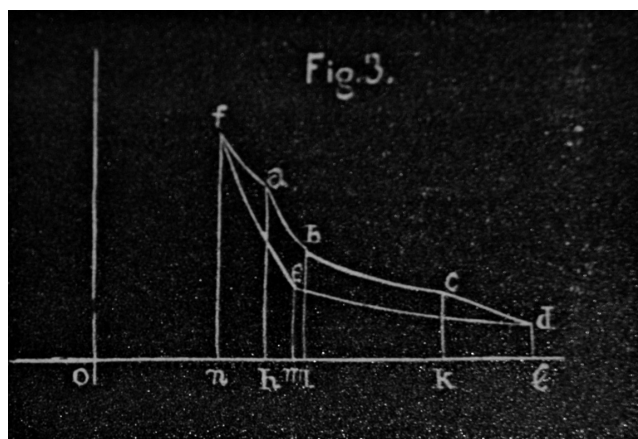
Lavtarjeva zamisel je bila podobna Ampèrovi teoriji vrtincev električnega toka v molekulah, čeprav tega ni posebej poudarjal. Ampèrovo valovno teorijo toplote iz let 1835–1836 je nadgradil začetnik razprševanja kovin William Robert Grove (* 1811; † 1896) leta 1842/43; sprejel jo je dunajski univerzitetni profesor fizike in predsednik akademije Andreas Baumgartner (* 1793; † 1865), po njem pa še Robida in Sekulić. Teslov profesor je k valovnim teorijam dodal še elektromagnetizem²⁴³ istočasno z Maxwellom, kar je utemeljilo Teslovo ljubezen do prenosa valov skozi vakuum: pot nevidnega skozi nevidno je prinašala luč.

Dvojica sil (sile dvojke, dvojke) so bile temeljni princip, na katerem je Teslov profesor Sekulić zgradil svojo fiziko atomov in molekul²⁴⁴ in z njo začrtal vizijo vakuuma svojega nedavnega maturanta Tesle. Sekulić je menil, da je mogoče vse vplive na telo opisati s silo rezultanto pri translaciji ali z dvojico sil pri vrtenju.

7.2 Tesla in Pupin

Tesla in dve leti starejši Mihajlo Pupin (* 1854; † 1935) sta izšla iz domala enakega pravoslavnega okolja Vojne krajine med njenim usodnim ukinjanjem. Tesla je imel polno podporo v slovansko navdahnjeni višji realki v Rakovcu, Pupin pa je požel precej več težav z nemškimi profesorji na višji realki v Pančevu, kjer sta ga branila predvsem profesor fizike Simon Kos (Koss, * 1828 Kostrvica pri Rogaški Slatini na Štajerskem), ki je odraščal v Blejskem kotu, in pravoslavni katehet Basil Živković, gotovo sorodnik Teslova kateheta Nikolausa Živkovića.

Pupinov profesor matematike Karl Klekler (* 1842 Dunajsko Novo mesto (Wiener Neustadt); † po 1901)



Slika 11: Kleklerjeva skica Carnot-Clapeyronovega krožnega procesa, s katerim ni dovolj navdušil svojega petnajstletnega dijaka Pupina (Klekler, 1869, 13).

je bil po objavah sodeč podobno izjemno podkovan kot Teslov profesor Sekulić. To niti ni posebej presenetljivo glede na to, da so bili profesorji v Vojni krajini bolj plačani in bolj opremljeni. Podobno kot Sekulić je tudi Klekler pisal o kinetični teoriji, ki pa jo je veliko bolj podpiral. Po drugi strani pa Klekler kot Nemeč ni maral Pupinovih narodnostnih izgrediv, medtem ko Tesla teh problemov v Rakovcu ni imel. Klekler je objavil številne geometrijske knjige; na višji realki v Pančevu je predaval med letoma 1869–1872,²⁴⁵ nato pa je bil profesor matematike pri mornariški akademiji na Reki do leta 1878. Sprva je predaval osnove matematike,²⁴⁶ leta 1874 ob asistentu, ukrajinskem vakuumistu Puluju, pozneje rektorju praške politehnike in dekanu elektrotehniške fakultete.

Leta 1877 je Klekler na Reki prevzel še pouk višje matematike, medtem ko je Peter Salcher poučeval mehaniko s fiziko in za Ernsta Macha pa fotografiral valovna čela nadzvočne hitrosti izstrelkov v morju.²⁴⁷ Klekler je svojo šolniško pot do konca stoletja nadaljeval kot direktor višje realke v Linzu in nato v 7. okraju Dunaja.²⁴⁸ Pupin se je pozneje s pridom spominjal profesorjev Slovenca Kosa in Srba Živkovića,²⁴⁹ Kleklerja pa je raje zamolčal; podobno je Tesla zatajil svojega profesorja Löfflerja iz Rakovca.

Vmes je tudi Tesla občutil nekaj narodnostne nestrpnosti v Gradcu. S Pupinom sta drug za drugim dokaj klavrno skušala študirati na tehniški visoki šoli v Slovanom prijazni Pragi. Ko sta ostala »kratkih rokovov«, sta se, znova drug za drugim, legendarno z

²⁴² Krönig, 1864, 305

²⁴³ Šešić, 1996, 58–59

²⁴⁴ Sekulić, 1874, 112 in dalje

²⁴⁵ Leta 1870 in 1871 ob fiziku Simonu Kosu (Koss, * 1828 Kostrvica pri Rogaški Slatini na Štajerskem, odrasel v Blejskem kotu) in pravoslavnem katehetu Basilu Živkoviću (babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015062383578;seq=878;view=1up;num=874, babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015062383560;seq=887;view=1up;num=881, ogleda 2. 2. 2013)

²⁴⁶ babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015062383552;seq=717;view=1up;num=713, Mornariška akademija na Reki leta 1872, ogled 2. 2. 2013

²⁴⁷ archive.org/stream/kaiskniglmlit03kriegoog#page/n771/mode/2up, str. 773 Mornariška akademija na Reki leta 1877, ogled 2. 2. 2012

²⁴⁸ www.antiquariat-schleifer.at/shop/auflistung.php3?search=verlag, ogled 2. 2. 2012

²⁴⁹ radnaetika.org/images/stories/Pupin.swf, Pupin, Mihailo Idvorski. 1929. Sa pašnjaka do naučenjaka. Veliki Bečkerek: Matica Srpska. Ogled 2. 2. 2013

nekaj centi v žepu odpravila v obljubljeni deželni – Ameriko. Pupin je bil tam uspešnejši po akademski plati in na dolge proge tudi gmotno; seveda pa je sodobna Teslova priljubljenost neprimerno večja od Pupinove, čeprav sta imela oba kar nekaj odmevnih izumov. Pupin je sicer izposloval pokojnino od jugoslovanskega kralja za dve leti mlajšega Teslo, v strokovnem in poslovnem pogledu pa sta si bila pogosto v laseh.

8 SKLEP

Po mariborskih in drugih zdrakah je Tesla obesil študij na klin; ni se več pustil poučevati in v resnici je vedel več kot drugi. Nedvomno ni bil samouk, saj se je najmodnejših vakuumskih tehnik in elektrotehnike priučil v Gradcu. Po drugi strani pa mu je vizija Sekuliceve vrtljive krogle z Boškovićevo enotno silo vcepila pogled na svet, ki si ga nikoli ni pustil spreminjati.

Pozneje, 24. 5. 1892, je Tesla osebno dajal nasvete zagrebškemu županu in njegovim sodelavcem glede javne električne razsvetljave z žarnicami v Zagrebu;²⁵⁰ Franjo Hanaman (* 1878; † 1941) je bil tisti čas še dijak realne gimnazije v Zemunu do mature leta 1895, osem let pozneje pa je na Dunaju še sam začel izumljati žarnice pod Teslovim vplivom. Tesla je med obiskom Zagreba gotovo dobro preučil položaj še v sosednjem Mariboru. Kljub zanimanju in naprednosti tedanjih mariborskih elektrotehnikov Tesla službe tam ni znal obdržati; seveda nam je lahko samo žal, a po »toči zvoniti« je prepozno.

Tesla je postal častni doktor na Dunaju leta 1904,²⁵¹ v Zagrebu, Gradcu in še marsikje; še bolj hudomušno je Edison brez vsakih šol prišel do častnih doktoratov. Edison je pisanje novinarjev bolje obvladal, vendar je bila njegova inženirska metoda vsaj spočetka le poskus-in-popravek-napake, medtem ko je Tesla stavil na miselne eksperimente. Po juliju 1904 je John Pierpont Morgan (* 1837; † 1913) ustavil podporo Teslovemu življenjskemu projektu *Wardenclyffe Tower* iz let 1901–1917, saj se je zdelo, da namerava izumitelj ameriško elektriko zastopj izvažati celemu svetu. Poklapani Tesla je nato začel spletati legendo okoli svoje lastne osebnosti in dosežkov, čeprav je bil pred tragedijo razmeroma skromen uspešnejš.²⁵² Medtem ko je usihal potok Teslovih elektrotehniških patentov, se je stopnjeval njegov sloves do današnjih dni.

Zahvala

Za pomoč se zahvaljujem Leopoldu Mikcu Avberšku, Dejanu Kacu, Brunu Besserju in Bratislavu Stojilkoviću.

²⁵⁰ Dadić, 2004, 12

²⁵¹ Mrkić, 2004, 45

²⁵² Pištalo, 2009, 348

9 LITERATURA IN VIRI

9.1 Arhivski viri

- AVA Min CU 31226 ex 1902
Knjižnica Tehniške univerze v Gradcu (TU)
Schaschl, Josef. 1878/79. *Technische Physik nach den Vorträgen des Herrn J. Pöschl k.k. ö.o. Professor and der k.k. technischen Hochschule in Graz 1878/79*. Universitätsbibliothek der TU Graz
Pokrajinski arhiv Maribor (PAM) fond Mestne občine Maribor 1528–1941, signatura SI_PAM/0005
K 22 (knjiga) – Indeks 1879 (splošna registratura)
K 101 – Delovodnik 1879 (splošna registratura, Geschaefits Protokoll 1879, no. 2160 8. 3. 1879 in no. 2675 24. 3. 1879)
K 531 – Obrtni registri, vodeni na podlagi obrtne zakonodaje 1859–1907: register za proste in rokodelske obrti 1866–1883; indeksi k obrtnim registrom: indeks I, proste in rokodelske obrti
Tehniška enota 642: Zbirke mikrofilmov gospodinjske kartoteke občine Maribor, signatura SI_PAM/0973
Matične knjige delavcev 1860–1990 v delavnicah Južne železnice, poznejši Tovarni vozil in toplotne tehnike Boris Kidrič, Maribor
Zgodovinski Arhiv Ljubljana (SI_LJU)
SI_LJU Prosti obrti, Cod. XX–, No. 45
SI_LJU 500, Domovinski oddelek, mikrofilma 403 in 567

9.2 Literatura

- Antolić, Moriz. 1864. Der Diamagnetismus und seine wichtigsten Beziehung zum Magnetismus. *Jahresberichte der k.k. Ober-Realschule zu Rakovac in der k.k. Kroatisch-Slavonischen Militär-Grenze*
Baš, Franjo. 1934. *Mariborske slike/poročila in slike zbral ter uredil F. J. Mrčenič; slike posnel Ivan Kovačič*. Maribor: Ljudska tiskarna
Bojč, Etbin. Šole in učiteljsvo na slovenskem Štajerskem pred sto leti (prispevek za šolsko zgodovino ob 200-letnici terezijanskih šol). *Časopis za zgodovino in narodopisje*, 1971, 42/7: 85–150
Bučič, Vesna. 1990. Ljubljanski urarji v 19. in začetku 20. stoletja. *Kronika (Ljubljana)*, 38/3: 116–127
Civrić, Zorana. 2011. *Teslin čudesni svet elektriciteta*. Beograd: Muzej Nikole Tesle
Ciperle, Jože. 2001. *Podoba velikega učilišča ljubljanskega: Licej v Ljubljani: 1800–1848*, Ljubljana
Cverava, Grant Konstantinovič (prevod Đapa-Ivetic, Vukosava; pogovor Ivanković, Radmilo; urednik Popović, Vojin. 2006. *Nikola Tesla 1856–1943*, Klub NT, Beograd
Czermak, Paul. 1884. Der Werth der Integrale A1 und A2 der Maxwells'chen Gastheorie unter Zugrundelegung eines Kraftgesetzes: *Kl. Wien. Ber.*, 89/2: 723–740
Czermak, Paul; Klemenčič, Ignac. 1893. Versuche über die Interferenz electrischer Wellen in der Luft. *Annalen der Physik*, 286/9: 174–188
Čech, Pavel. 2005. Rodovniški pregled Lipičevih prednikov in potomcev. *Osnovne značilnosti dipsobiostatike* (Fran Vijem Lipič). Ljubljana: ZRC SAZU. 111–149
Čermelj, Lavo. 1971. Simon Šubic (geslo). *SBL*. 713–715
Črnivec, Živka i drugi (ur.). 1999. *Ljubljanski klasiki 1563–1965*. Ljubljana: Maturanti klasične gimnazije
Dadić, Žarko. 1982. *Povijest egzaktih znanosti u Hrvata*. Zagreb: Sveučilišna naklada Liber
Detela, Andrej. 2013. Nikola Tesla: globina ni dovolj, potrebna je jasna. *Nikola Tesla. Moji izumi*. Ljubljana: Sanje. 120–147
Elschnig, Anton. 1861. Übersichtliche Darstellung der Wärmeverhältnisse im Thierreiche. *Triester Gymnasialprogramm vom Jahre 1861*
Elschnig, Anton. 1869. Kurzgefasste Anleitung zu barometrischen Nivellirungen mit Quecksilber- und Metallbarometern, nebst e. Anhang, zahlr. barometrisch u. trigonometrisch bestimmte Höhen von Salzburg enthaltend. *Jahresberichte der k. k. Oberrealschule in Salzburg* 3. Salzburg: Glonner
Eittingshausen, Albert. 1895. Über hochgespannte Wechselströme. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. Letnik 1894: LI
Eittingshausen, Andreas Ritter von. 1857. *Die Principien der heutigen Physik bei der freier der Übernahme der ehemaligen Universitätgebäudes von der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften am XXIX october MDCCCLVII*. Wien: Kaiserl. königl. Hof- und Staatsdruckerei
Feussner, Wilhelm. 1873. Ueber die von Herrn Sekulic beschriebene Interferenzerscheinung. *Annalen der Physik*. Sep.-Abz., 225/8: 561–564

- Fessner, Wilhelm. 1877. Neuer Beweis der Unrichtigkeit der Emissions-theorie des Lichts. *Annalen der Physik*. 236/2: 317–332
- Gavarret, Jules Louis Denis. 1859. *Lehrbuch der Elektrizität*. Leipzig: Brockhaus
- Golob, Andreas. 2012. Mladostna leta v Mariboru. Dnevnik zoologa Karla Heiderja 1870–1873. *Zgodovina za vse*. 19/1–2: 82–100
- Grazer *Geschäfts- und Adreß-Kalender für das Jahr...* Graz: Selbstverlag der Buchdruckerei Gutenberg
- Hartman, Bruno. 1983. Slavjanofil Ivan Sergejevič Aksakov v Mariboru leta 1860. *Časopis za zgodovino in narodopisje*. 54–19/1–2: 125–144
- Hartman, Bruno. 1985. Knjižnica mariborske realke (Realne gimnazije) (1870–1941). *Časopis za zgodovino in narodopisje*. 56/2: 139–162
- Hartman, Bruno. 1991. Knjižnice v Mariboru. *Maribor skozi stoletja, Razprave I* (ur. Curk, Jože). Maribor: Obzorja. 313–414
- Hartman, Bruno. 2001. *Kultura v Mariboru*. Maribor: Obzorja
- Hartman, Bruno. 2007. Mariborsko filharmonično društvo. *Časopis za zgodovino in narodopisje*. 78=43/2–3: 79–120
- Hartman, Bruno. 2009. *Maribor – dogajanja in osebnosti*. Maribor: Litera
- Horvat, Rudolf. 1941. *Lika i Krbava. Povijesne slike, crtcie i bilješke*. Svezak II. Zagreb: Tipografija
- Hübl, Franz. 1869. *Systematisch-geordnetes Verzeichnis derjenigen Abhandlungen, Reden und Gedichte, welche die an den inländischen Mittelschulen vorhandenen österreichischen, preussischen und bairischen Schulprogramme enthalten, mit einem Vorworte und einem Anhang, zusammengestellt von Hübl Franz, Prof. am k.k. Gymnasium in Czernowitz*. Czernowitz : Josef Buchowiecki & Comp. books.google.si/books?id=shJMAAAAcAAJ&printsec=frontcover&hl=sl#v=onepage&q&f=false, ogled 18. 1. 2012
- Ifko, Sonja. 2012. Zgrade radionica Südbahn željeznica u Mariboru i njihov utjecaj na urbanistički razvoj grada. *5th Pro Torpedo Annual Conference 25 to 26 May in Rijeka, Croatia. Collection of Summaries*. Rijeka: Pro Torpedo. 66–67
- Jamnicky, Johann. 1880. Meteorologijiska opažanja na c. kr. velikoj realci u Rakovcu. *Jahresber. der k. k. Ober-Realsch. in Rakovac 1879–80*. Zagreb: Albrecht. 25–32, 99–114
- Jettmar, Heinrich. 1879. Bestimmung der Bildorte und Wellenform der an Ebenen Flächen reflectiren und gebrochenen Lichtstrahle, auf elementare Wege. *Programm Marburg Gymnasium*. 3–26 in 3 strani risb
- Jettmar, Heinrich. 1883. Studien über die Strahlen-brechung im Prisma. *Programm Marburg Gymnasium*. 3–39
- Jovanović, Branimir. 2001. *Tesla: duh, delo, vizija*. Beograd: Freemental
- Jurik, Josefina. 1884. *Jurik's Adress-buch der Stadt Marburg: mit einem ausführlichen Wohnungs-Anzeiger, Schematismus der Behörden, des Handels-, Fabriks- und Gewerbewesens und geschichtlichen, topografischen und statistischen Daten*. Marburg/Maribor: J. Jurik & Johann Leon
- Južnič, Stanislav. 2010. *Zgodovina raziskovanja vakuumskih tehnik 2*. Ljubljana: DVTS
- Kayser, Heinrich. 1908. *Handbuch der Spectroscopie. 4. Natürliche farbstoffe der Pflanzen. Die Farbstoffe von Blut, harn, galle. Thierische Farbstoffe. Dispersion. Fluorescenz*. Leipzig, Hirzel
- Klekler, Karl. 1869. Die Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie, *Sechter Jahresbericht über die k. k. Oberrealschule in der Militärgrenz-Communität Pančova*. Pancsova: Anton Siebenhaar. 3–18
- Knobloch, Gustav. 1884. Ueber Transformation in der orthogonalen Axonometrie. *Programm Marburg k.k. Staats-Oberrealschule*. 1–34
- Kral, Johann. 1872. *Der Morse-Telegraph. Ein Handbuch zum Gebrauche für Telegraphen-Aspiranten und Beamte*. Maribor: samozaložba
- Krönig, August Karl. 1864. Ueber die Concentration der Luftarten. *Ann. Phys.*(2) 123: 299–332
- Kulišić, Kosta. 1931. Sedamdesetpetogodišnjica Nikole Tesle – Buran studentski život i prva stvaranja. *Politika (Beograd)* 19. 7. 1931, stran 10 s sliko
- Kulišić, Kosta. 1936. *Nikola Tesla. Njegov djački život i naučni rad [u kratkim crtama]*. Sarajevo
- Kuret, Primož. 2001. *Mahler in Laibach, Ljubljana 1881–1882*. Wien: Böhlau
- Lane, Timothy. 1767. Description of an electrometer invented by Mr Lane. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 57: 451–460
- Laska, Antun. 1877. Etlundova teorija munjevitih pojava. *Izvišće o kralj. Velikoj gimnaziji u Osijeku* (Zagreb). 3–45
- Lavtar, Luka. 1873. Vse prikazni v naravi so nasledek ene same preproste stvari z eno samo bistveno močjo (s privlačnostjo). *Letopis SM*. 71–88
- Lazarevič, Žarko. 1887. Začetki uvajanja telefonije v Ljubljani. *Kronika (Ljubljana)*. 35/1–2: 97–100
- Leskovec, Antoša. 1983. Upravni in gospodarski razvoj Maribora v 19. stoletju. *Kronika*. 31/2–3: 167–175
- Leskovec, Antoša. 1991. Zgodovina uprave v Mariboru 1752–1941. Maribor: Obzorja. 229–311
- Leskovec, Antoša. 1991. Razvoj gospodarstva v Mariboru: 1752–1941. *Maribor skozi stoletja, Razprave I* (ur. Curk, Jože). Maribor: Obzorja. 313–414
- Leskovec, Antoša. 1998. Gospodarstvo v Mariboru od srede 19. stoletja do prve svetovne vojne. *Od Maribora do Trsta: 1850–1914 : zbornik referatov*. Maribor: Pedagoška fakulteta (ur. Friš, Darko, Rozman, Franc). 105–125
- Lippich, Ferdinand. 1870. Ueber die Breite der Spectrallinien. *Ann. Phys.* 139(215): 465–479
- Lippich, Ferdinand. 1880. Untersuchungen über die Spectra gasförmiger Körper. *Wien. Ber.* 82/2: 15–33
- Löffler, Augustin. 1872. Novi nauk o geometriji. *Siebente Jahresberichte der k.k. Ober-Realschule zu Rakovac in der k.k. Kroatisch-Slavonischen Militär-Grenze*. Rakovac: Albrecht, Agram. Strani 3–17 z eno sliko
- Löffler, Augustin. 1874. Tjelovježba u pučkoj školi. II. *Obća hrvatska učiteljska skupština u Petrinji 25.–27. kolovoza 1874*. Zagreb: Centralni odbor obćih hrvatskih učiteljskih skupština. 223–237
- Löffler, Augustin. 1879. *Gimnastika za učitelje pučkih učiona i učitelje pripravnike*. Zagreb
- Ludwig Karl. 1856. Diffusion zwischen ungleich erwärmten Orten gleich zusammengesetzter Lösungen. *Wien. Ber.* 20: 539
- Marek, Bernhard; Pöschl, Jakob. 1865, 1867. Jahres-Uebersicht der meteorologischen Verhältnisse von Steiermark. Nach der Angaben von 11 (10) Beobachtungs-Stationen zusammengestellt. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. III. für 1864, 3: 151–175 (1865); für 1865, 4: 123–150 (1867)
- Marinčić, Aleksandar. 2006. *Nikola Tesla – stvaralaštvo genija/Nikola Tesla – The Works of a Genius*, Srpska akademija nauka i umetnosti i Odbor za obeležavanje 150 godina rođenja Nikole Tesle, Beograd
- Mayer, Daniel. 1996. Nikola Tesla in Prague in 1880 – some details from Tesla's life, until now unpublished. *Tesla III Millennium. Fifth International Conference*. Beograd. VI/67–VI/69
- Mikišić, Marko. 1883. Meteorološka opažanja. *Program realne gimnazije u Rakovcu g. 1883*
- Mircevski, Slobodan; Cundev, Milan; Andonov, Zdravko. 2007. Development of the Induction Motor from Tesla until Today. *Electronics*. 11/1–2: 20–24
- Mlakar, Jasna. 1998. Razvoj mariborskega vodovoda. *Zgodovina za vse*. 5/1: 5–20
- Mrkić, Dan. 2004. *Nikola Tesla – europske godine*. Beograd: Muzej Nikole Tesle
- Muljević, Vladimir. 1973. Martin Sekulić (1833–1905). *Elektrotehnika: znanstveno-stručan časopis Hrvatskoga elektroinženjerskog saveza i udruženih izdavača*. 5: 331–338
- Orožen, Janko. 1974. *Zgodovina Celja in okolice, II del*. Celje: Kulturna skupnost
- Pančur, Andrej. 2007. Opis oderuhov v 19. stoletju na Slovenskem. *Acta Histriae*. 15/ 1: 179–194
- Pertl, Eman. 1991. Zgodovina mariborskega zdravstva. *Maribor skozi stoletja, Razprave I* (ur. J. Curk). Maribor: Obzorja. 565–583
- Pichler, Franz. 2004. On the University Studies of Nikola Tesla in Graz and Prague. *EMCSR 2004, Vienna, April 13–16, 2004, Symposium »History of Cybernetics, Information Technology and Systems Research«*
- Pichler, Franz; Asenbaum, Augustinus. 1996. Zum Studium von Nikolaus Tesla in Graz und Prag. *Plus Lucius*. 2/96: 9–13
- Pištal, Vladimir. 2009. *Tesla, portret među maskama*. Novi Sad: Budućnost; 2012. *Tesla, portret med maskami*. Ljubljana: Modrijan
- Plentaj, Fran. 1867. Vom Wurzelziehen im Allgemeinen und Wurzelziehen im Besonderen. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*. Wien. 169, 107; *Anzeiger der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, 18: 154; *Denkschriften der Kaiserliche Akademie der Wissenschaften, mat-nat. Klasse*. 4/7: 54
- Podgoršek, Nataša. 2006. Zgodovina uprave v Mariboru 1750–1918. *Obćinske volitve v mestu Maribor 1861–1912. Studia historica Slovenica*. 6/2–3: 361–379
- Pöschl, Jakob. 1863. Ueber einen Ruhmkorffschen Induktionsapparat. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. 28. 2. 1863, 1: 51–52
- Pöschl, Jakob. 1868. Über den neuesten Typendruck-Telegraphen von Hughes. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. 5: XXXI (27. 4. 1867)
- Pöschl, Jakob. 1869. Ueber das transatlantische Kabel und seine Sprechmethode. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. 6: XXXVII–XXXVIII (25. 1. 1868)
- Pöschl, Jakob. 1870. Ueber »singende Flammen«. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. 7/2: LXXXIX
- Pöschl, Jakob. 1875. Ueber neuere Elektromaschinen insbesondere Gramme's System. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. Graz. LXVIII–LXXI
- Pöschl, Jakob. 1879. Ueber das »Telephon«. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark* Jahrg. 1878. 10. Maj 1879 XXXIX–XLI
- Priča, Nikola. 1883. O odnošaju između molekularne težine i gustoće plinova (para). *Program realne gimn. u Rakovcu g. 1883*

- Puff, Rudolf Gustav; Curk, Jože. 1999. *Maribor: njegova okolica, prebivalci in zgodovina*. Maribor: Obzorja
- Reibenschuh, Franz Anton. 1867. Ueber die Alpen. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. 4: XXXV
- Reibenschuh, Franz Anton. 1868. Die Grotte bei Sachsenfeld. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. 5: 76–84
- Reibenschuh, Franz Anton. 1871. Ueber Grubengas und neuere Beleuchtungsstoffe. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. CXLII–CXLV
- Reibenschuh, Franz Anton. 1871. Die neueren chemischen Theorien: Einleitung in das Studium der modernen Chemie. *Programm Marburg k.k. Staats-Oberrealschule Erster Jahresbericht. Veröff. am Schlusse d. Studienjahres 1871*. 75 strani
- Reibenschuh, Franz Anton. 1877. Ueber die Harze mit besonderer Berücksichtigung der fossilen Harze Steiermarks. *Fünfter Jahresbericht der k.k. Staats-Oberrealschule in Graz*. 50 strani
- Reibenschuh, Franz Anton. 1878. Ueber die Theorie der Flamme. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. 20. 1. 1877. XXVII–XXXVI
- Reibenschuh, Franz Anton. 1883. Über das Methylbiguanid und seine Verbindungen. *Monatshefte für Chemie und verwandte Teile anderer Wissenschaften*. 41: 388–394
- Reithammer, Anton Emil. 1866. Feuerkugel am 6. September 1866 in Pettau. *Zeitschrift der österreichischen Gesellschaft für Meteorologie*. 250
- Reithammer, Anton Emil. 1867. Ueber den Ozongehalt der atmosphärischen Luft. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. 76–80 (10. 12. 1865)
- Resch, Peter. 1884, 2012. *Das Moderne Kriegerrecht Der Civilisirten Staatenwelt*. Graz, Leipzig: U. Moser
- Richter, Kurt R. 2007. Nikola Tesla' European Time. *Proceedings of the Symposium »Tesla in Croatia« Annual Report on the Activities of the Croatian Academy of Engineering 2006*. 335–357
- Robida, Karl. 1863. Grundzüge Einer Molekularphysik und einer mechanischen Theorie der Elektrizität und des Magnetismus. Von Dr. S. Šubic, Z. öst. Gym. 14: 463–465
- Rogner, Johann. 1869. Ueber Rechenmaschinen. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. XLIII (25. 4. 1869)
- Rogner, Johann. 1871. *Ueber Johann Kepler's Leben und Wirken. Festrede den 15. October 1871 bei der Vorfeier des 300jährigen Geburtstages Kepler's zu Schloss Mühleck nächst Graz gehalten*. Graz
- Rozman, Franc. 1979. *Socialistično delavsko gibanje na slovenskem Štajerskem*. Maribor: Obzorja
- Sabaz-Deranja, Loredana. 1994/95. *Vecchi mezzi didattici del laboratorio di scienze: un museo scolastico*. Capodistria: Ginnasio Gian-Rinaldo Carli
- Schaschl, Josef. 1886. Die Galvanostegie, mit besonderer Berücksichtigung der fabrikmässigen Herstellung dicker Metallüberzüge auf Metallen mittelst der galvanischen Stromes. *Elektro-technische Bibliothek*, 30. Bd. Wien: Hartleben, F. Vieweg & Sohn
- Schaschl, Josef. 1893. Der Westinghouse-Motor. *Mittheilungen aus dem Gebiete des Seewesens* (Pula: Karl Gerold Sohn), Beilage. 21/4–5: 1–20
- Schwarz, Heinrich. 1879. Zur Philosophie der Technik. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. LXV–LXX
- Sekulić, Martin. 1872. Polarna zora kao učinak zemaljske munjine. *Rad*. 20: 39–60
- Sekulić, Martin. 1872. Ultraviolette Strahlen sind unmittelbar sichtbar. *Chemisches Central-Blatt*. 43/3: 417–418
- Sekulić, Martin. 1873. Eine merkwürdige Interferenzerscheinung. *Annalen der Physik*. 225/5: 126–128
- Sekulić, Martin. 1874. Fizika atoma i molekula. *Rad*. 26: 109–152
- Sekulić, Martin. 1874. Burnjak. Izumio i preračunao M. S. *Rad*. 27: 69–76, slika na str. 225 in 226
- Sekulić, Martin. 1875. Ueber die an bestäubten und unreinen Spiegeln sichtbare Interferenzerscheinung. *Annalen der Physik*. 230/2: 308–316
- Sekulić, Martin. 1877, 1879, 1881. Uzrok munjotvornoj sili. *Rad*. 41: 105–121, 50: 1–31, 58: 171–190
- Sekulić, Martin. 1878. Elementarni nauk o harmoničnom titranju. *Izvešće c. k. vel. realke u Rakovcu za g. 1877/8*
- Sekulić, Martin. 1878. *Anzeiger der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*. 16: 129
- Sokol, Velimir. 1981. *Stogodišnjica telefonije u Hrvatskoj*. Zagreb
- Spiller, Robert. 1877. Ueber Beziehungen des Galvanismus zur theoretischen Chemie. *VII. Jahresberichte der k. k. Staatsoberrealschule in Marburg*. 3–28
- Spiller, Robert. 1889. Beitrag zur Kenntnis der Marburger Brunnenwässer. *XIX. Jahresberichte der k. k. Staatsoberrealschule in Marburg*. 1–33
- Stiller, Wolfgang. 1989. *Ludwig Boltzmann*. Frankfurt am Main: Thun
- Strkljević, J. 1876/1877. Nješto o uztrajnih momentih i razu. *Jahresberichte der k.k. Ober-Realschule zu Rakovac in der k.k. Kroatisch-Slavonischen Militär-Grenze*
- Studen, Andrej. 2010. Maribor na poti v moderno mesto. *Mesto in gospodarstvo : mariborsko gospodarstvo v 20. stoletju*. Ljubljana/ Maribor. 35–56
- Šamperl Purg, Kristina. 2001. Oris nacionalne podobe tehniške inteligence v avstroogrski monarhiji ob prelomu stoletja na primeru Janeza Puha. *Melikov zbornik*. Ljubljana: ZRC SAZU. 655–666
- Šešić, Marija. 1996. Martin Sekulić, prvi Teslin profesor fizike. *Flogiston*. Št. 4: 54–82
- Šubic, Simon. 1860. Physikalische Abhandlung über die Zusammensetzung fortschreitender und drehender Bewegungen und ihre Anwendung zur Erklärung der Aberration des Lichtes, des Foucault'schen Pendelversuches, des Erscheinens des Freischwebens der rotirenden Scheibe an Fessel's Rotationsmaschine und am Kriesel. *Jahres-Bericht der Ober-Realschule zu Pest*. 1–56
- Šubic, Simon. 1861. *Lehrbuch der Physik für Ober-Gymnasium und Ober-Realschulen*. Pesth: Gustav Heckenast; 2. izdaja Pest 1867; 3. izdaja Buda-Pest 1874
- Šubic, Simon. 1862. Der Hebel und die Kräftepaare nebst ihrer Anwendung in der Mechanik, *Erster Jahres-Bericht der Wiener Kommunal-Realschule in der Vorstadt Rossau*, 3–44
- Šubic, Simon. 1862. K. Robida, Erklärung der Lichterscheinungen. *Zeit. gymn.* 13: 320–322
- Šubic, Simon. 1862. *Grundzüge einer Molekular-Physik und einer mechanischen Theorie der Elektrizität und des Magnetismus*. Wien: Braumüller
- Šubic, Simon. 1864. Th. Gerding, Schule der Physik für Lehranstalten und zum Privatgebrauch. *Z. öst. Gym.* 15: 526–529
- Šubic, Simon. 1871. *Lehrbuch der Physik für Unter-Realschulen*. Pest: Gustav Heckenast
- Šubic, Simon. 1872. Mehanična teorija o toploti, 1. del. *Rad*. 19: 12–61
- Šubic, Simon. 1874. Dinamična teorija o plinih. *Rad*. 29: 1–144
- Šubic, Simon. 1875. Telegrafija, zgodovina njena in današnji stan. *Letopis slovenske matice*. 1–57
- Tesla, Nikola. O kapilarnim cevima. *Srbadija : Almanah Srp. akad. liter. Društva »Srbadije« u Gracu. Uređuje ured. odbor*. Novi Sad: A. Pajević. 1–236, tu str. 1
- Těšínská, Emilie. *Ernst Mach, his Prague physics students and their careers* www.muni.cz/press/books/files/mach75.pdf, ogleđ 23. 1. 2013
- Toepler, August. 1875. Experimental-Vorlesung über die Erscheinungen der Capillarität. *Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*. 10. 4. 1875: XLIX–LI
- Torbar, Josip. 1871. Sjeverna zora. *Rad*. 17: 90–111
- Tuschar, Gregor. 1855. Ueber die Konstruktion der Materie nach der atomistischen Ansicht; Aphoristisches für Philologen über das Unterrichtsverhältniss der Muttersprache zu jenem in den classischen. *Programm des k.k. Katholischen Gymnasiums zu Preßburg am Schlusse des Schuljahres*. 23+1 strani
- Šantel, Anton. 2006. *Zgodbe moje pokrajine*. Ljubljana: Nova revija
- Vovko, Andrej. 2001. Gimnazijska leta dr. Pavla Turnerja. *Studia Historica Slovenica*. 1/1: 33–52
- Winter, Karl. 1847. Ein neuer Electrophor-Apparat. *Berichte über die Mittheilungen von Freunde der Naturwissenschaften in Wien*. 2: 49–50
- Wittenbauer, Ferdinand. 1903. *Filia hospitalis*; 1906. Wien: Carl Konegen
- Wittenbauer, Ferdinand. 1905. *Der Privatdozent*. Leipzig: G. Wigand
- Wohinz, Josef W. 2007. Nikola Tesla – ein genialer »Elektriker«. Acham, Karl (ur.). *Kunst und Wissenschaft aus Graz I. Naturwissenschaft, Medizin und Technik aus Graz*. Wien: Böhlau. 167–184
- Wollaston, William Hyde. 1813. On a Method of Freezing at a Distance. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 103: 71–74
- Zorić, Ivana. 2010. *Fotografije iz Teslinog albuma*. Beograd: Muzej Nikole Tesle
- Zwitter, Fran. 1962. *Nacionalni problemi v habsburški monarhiji*. Ljubljana: SM

DRUŠTVENE NOVICE

PREGLED KONFERENC V LETU 2014

IUVSTA workshop: Plasma-assisted vapour deposition of oxide based thin films and coatings

6.–11. april 2014, Schloss Seggau, Avstrija
(rok za povzetek: 15. oktober 2013)
iuvsta72.unileoben.ac.at

41th International conference on metallurgical coatings & thin films – ICMCTF 2014

28. april–2. maj 2014, San Diego, ZDA
(rok za povzetek: 1. oktober 2013)
www2.avs.org/conferences/icmctf

5th International conference on plasma medicine – ICPM5

18.–23. maj 2014, Nara, Japonska
(rok za povzetek: 20. december 2013)
icpm5.plasmabio.com

21th International conference on plasma surface interactions 2014

26.–30. maj 2014, Kanazawa, Japonska
(rok za povzetek: 9. december 2013)
psi2014.nifs.ac.jp

European materials research society spring meeting – EMRS

26.–30. maj 2014, Strasbourg, Francija
rok za povzetek: 16. januar 2014
www.emrs-strasbourg.com

Mednarodni znanstveni sestanek Vakuumska znanost in tehnika

Hrvaško-slovensko srečanje vakuumistov
maj/junij 2014, Hrvaška
rok za povzetek: april/maj 2014
www.cro-vacuum.hr (domača stran društva)

3rd Austrian symposium on carbon based coatings

4.–5. junij 2014, Schloss Seggau, Avstrija
(rok za povzetek: 31. oktober 2013)
www.asmet.at/cbc2014

15th Joint vacuum conference – JVC-15

15.–20. junij 2014, Dunaj, Avstrija
rok za povzetek: 3. februar 2014
www.iap.tuwien.ac.at/jvc15

10th Coatings science international – COSI 2014

23.–27. junij 2014, Noordwijk, Nizozemska
(rok za povzetek: 15. december 2013)
www.coatings-science.com

65th Annual meeting of the International society of electrochemistry

31. avgust–5. september 2014, Lausanne, Švica
rok za povzetek: 14. marec 2014
annual65.ise-online.org

16th Annual conference YUCOMAT

1.–5. september 2014, Herceg Novi, Črna gora
rok za povzetek: 1. maj 2014
www.mrs-serbia.org.rs

International conference on diamond and carbon materials 2014

7.–11. september 2014, Madrid, Španija
rok za povzetek: 24. marec 2014
www.diamond-conference.elsevier.com

The European corrosion congress – EUROCORR 2014

8.–12. september 2014, Pisa, Italija
rok za povzetek: 13. januar 2014
www.eurocorr2014.org

14th International conference on plasma surface engineering – PSE 2014

15.–19. september 2014, Garmisch-Partenkirchen, Nemčija
rok za povzetek: 31. januar 2014
www.pse-conferences.net/pse2014.html

European materials research society fall meeting – EMRS

15.–19. september 2014, Varšava, Poljska
rok za povzetek: maj/junij 2014
www.emrs-strasbourg.com

50th International conference on microelectronics, devices and materials – MIDEM 2014

september 2014, Slovenija
rok za povzetek: maj 2014
www.midem-drustvo.si (domača stran društva)

15th International conference on thin films

13.–16. oktober 2014, Dubrovnik, Hrvaška
rok za povzetek: 10. april 2014
ictf16.com

22. konferenca o materialih in tehnologijah

november 2014, Portorož, Slovenija
rok za povzetek: junij/julij 2014
www.imt.si/konference

SPOROČILO ZA JAVNOST

Sistema za zajem helija

Asslar, Nemčija, 14. november 2013. Helij kot testni plin je ključni del standardnih merilnikov netesnosti. Helij ni obnovljiv, dobava je omejena, cena pa stalno raste zaradi vse večje potrebe po visokokakovostnih izdelkih v industriji. Ker je pri načrtovanju procesov vse pomembnejša učinkovitost in varčna poraba virov, je Pfeiffer Vacuum razvil dva sistema za zajem helija, ki omogoča zajem in recikliranje plina, ki se uporablja v detekciji netesnosti.

Zajem uporabljenega helija je še posebej uporaben za zadoščanje zahtevam okoljevarstvenega certifikata DIN EN ISO 14001, kakor tudi za zmanjšanje porabe virov. Sistema za zajem helija sta narejena kot samostojni enoti, ki omogočata zajem testnega plina helija ne glede na proizvajalca sistema za detekcijo

netesnosti. Odvisno od uporabljenih procesnih parametrov lahko zajamemo do 98 % inertnega plina s koncentracijami helija v območju med 10 % in 95 %.

Na voljo sta dva sistema Pfeiffer Vacuum za zajem helija: zajem z balonom in zajem z rezervoarjem. Poleg tega lahko na posebno zahtevo pripravimo tudi specifične rešitve glede na zahteve naročnika.

Pfeiffer Vacuum razvija in proizvaja sisteme za detekcijo netesnosti za kateri koli vakuumski sistem, kjer se ob visoki produktivnosti zahteva zajamčena tesnost posameznih komponent. Podjetje tudi ponuja širok izbor detektorjev netesnosti, ki kot sledni plin uporabljajo helij ali vodik, in to za širok spekter aplikacij.

Več informacij na: www.pfeiffer-vacuum.com.

