

ICONISMUS XI



VAKUUMIST

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

48 let
DVTS

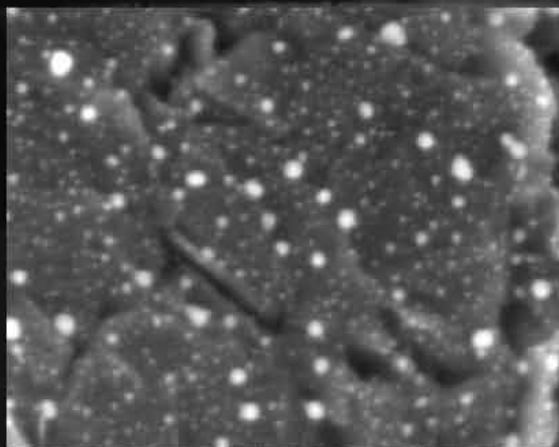
LJUBLJANA, DECEMBER 2007

ISSN 0351-9716

LETNIK 27, ŠT. 4 2007

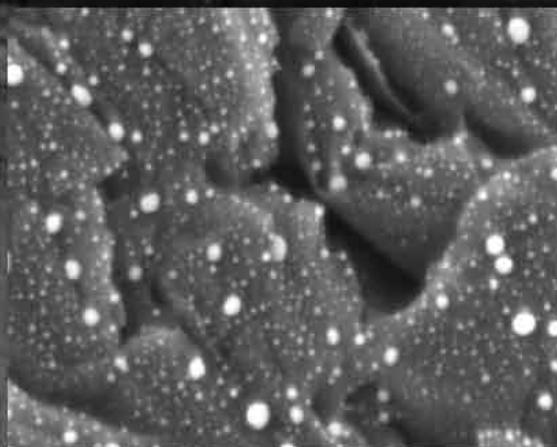
UDK 533.5.62:539.2:669-982

JEOL Aberration (Cs & Cc) corrected FESEM



1kV Correction-off

x300,000



1kV Correction-on

x300,000



Model JSM-7700F



SCAN d.o.o. Preddvor

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

VSEBINA

ČLANKI

* Vakuumsko indukcijsko taljenje (Franc Zupanič)	4
* Lasersko reparaturno varjenje dupleksno zaščitene orodnih jekel (Janez Tušek, Tadej Muhič, Matej Pleterski, Damjan Klobčar)	9
* Sanacija termorazpok na orodjih za tlačno litje z lasersko tehnologijo (Matej Pleterski, Janez Tušek, Tadej Muhič, Klemen Pompe)	16
* Anodni ionski izvir (Miha Čekada, Markus Kahn, Wolfgang Waldhauser)	20
* Vakuum Trubarjevih dni (ob 500-letnici Trubarjevega rojstva) (Stanislav Južnič)	23

Obvestilo

Naročnike Vakuumista prosimo,
da čim prej poravnate naročnino
za leto 2007.

Cena števil, kolikor jih bo izšlo
v letu, je 20,00 EUR

SPONZORJI VAKUUMISTA:

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

VAKUUMIST

Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije

Glavni in odgovorni urednik: dr. Peter Panjan

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

Tehnični urednik: Miro Pečar

Lektor: dr. Jože Gasperič

Korektor: dr. Miha Čekada

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

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

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

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

Številka transakcijskega računa pri NLB: 02083-0014712647

Oblikovanje naslovne strani: Ignac Kofol

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

Naklada: 400 izvodov

VAKUUMSKO INDUKCIJSKO TALJENJE

Franc Zupanič

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

POVZETEK

Pri vakuumskem indukcijskem taljenju talimo kovinske materiale z električno indukcijo v vakuumu. Postopek je primeren skoraj za vse kovinske materiale, prednostno pa se uporablja za primarno taljenje zlitin, ki vsebujejo zelo reaktivne elemente, saj zagotavlja njihov dober izkoristek ter ponovljivo doseganje načrtovane kemijske sestave. Prav tako je nepogrešljiv za visokotehnološko zahtevne zlitine, kjer se zahteva izredno majhna vsebnost plinov, lahkoizparljivih elementov ter majhen delež nekovinskih vključkov. Kljub številnim dobrim stranem vakuumskega indukcijskega taljenja kakovost ulitkov po taljenju in litju ni zadostna pri najzahtevnejših rabah, zato se v teh primerih ulitki ponovno pretalijo (npr. z vakuumskim obločnim taljenjem, taljenjem z elektronskim curkom) in nato preoblikujejo.

Vacuum induction melting

ABSTRACT

Vacuum induction melting (VIM) is used for melting of metallic materials by using electrical induction under vacuum conditions. The process is appropriate for almost all metallic materials and is preferentially used for primary melting of alloys that contain very reactive elements (superalloys, titanium alloys, tool and magnetic steels). It assures high yield of reactive alloying elements and reproducible attainment of required chemical composition. VIM is also inevitable for production of demanding high-performance alloys that must contain very small amounts of gases, harmful trace elements and non-metallic inclusions. Despite numerous advantages of VIM the quality of castings is often insufficient for highly demanding applications, therefore castings must be remelted (e. g. by vacuum arc remelting and electron beam melting) and exposed to forming operations.

1 UVOD

Vakuumsko indukcijsko taljenje je postopek taljenja kovin z električno indukcijo v vakuumu. Čeprav segajo začetki vakuumskega indukcijskega taljenja že v konec devetnajstega stoletja ⁽¹⁾, je postal postopek industrijsko pomemben šele v petdesetih letih dvajsetega stoletja. Pomemben razlog za to je bil tudi razvoj zelo učinkovitih vakuumskih črpalk, ki so jih razvili v okviru ameriškega jedrskega programa ⁽²⁾. Predvsem pa so se povečale zahteve pri izdelavi zlitin, odpornih proti visokim temperaturam, in superzlitin¹, ki vsebujejo velike količine reaktivnih elementov, kot sta aluminij in titan, in ki morajo imeti veliko trajnost in zanesljivost. Zaradi uporabe vakuumskega indukcijskega taljenja sta se zmogljivost in vzdržljivost reaktivnih motorjev zelo povečala ^(3,4). To je bilo zelo pomembno tako za vojaško kot tudi za civilno letalstvo. Uspeh pri proizvodnji superzlitin z vakuumskim indukcijskim taljenjem je spodbudil tudi proizvodnjo drugih strateško pomembnih zlitin, ki se uporabljajo v

jedrskih reaktorjih ter v elektroniki. Še dodatna dobra stran je, da se zaradi majhnih izgub elementov uporablja pri izdelavi drugih zlitin, pri katerih odsotnost plinov in nekovinskih vključkov ne igra tako pomembne vloge.

Vakuumsko indukcijsko taljenje je najbolj fleksibilno med postopki vakuumskega taljenja, ker omogoča neodvisno spreminjanje temperature, tlaka in masnega transporta. Slednje omogoča mešanje taline, ki jo povzročajo inducirani tokovi. Zato lahko pri vakuumskem taljenju ponovljivo dosežemo želeno kemijsko sestavo taline v zelo ozkih tolerančnih mejah; in to ne le deleže želenih zlitinskih elementov, temveč tudi deleže koristnih in škodljivih elementov v sledovih.

Zlitine, ki jih vakuumsko indukcijsko talimo, so:

- nikljeve superzlitine ⁽²⁻⁶⁾
- kobaltove zlitine ^(3,4)
- bakrove zlitine, predvsem malolegirane s Cr, Zr ⁽⁷⁾
- orodna jekla ⁽³⁾
- nerjavna jekla ⁽⁸⁾
- magnetne zlitine ⁽³⁾
- titanove zlitine ⁽⁹⁾
- intermetalne zlitine ⁽¹⁰⁾
- posebne aluminijeve zlitine ⁽¹¹⁾

2 VAKUUMSKE INDUKCIJSKE PEČI

Vakuumske indukcijske peči se močno razlikujejo po velikosti ^(2,5). Na razpolago so majhne laboratorijske peči (slika 1 a), v katerih lahko stalimo le nekaj kilogramov zlitine, do velikih industrijskih peči (slika 1 b), ki imajo kapaciteto tudi do 60 t. Shematičen prikaz vakuumске komore je na sliki 2.

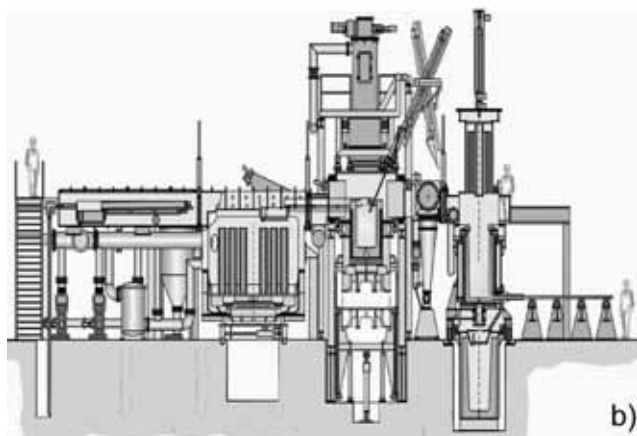
Vakuumska komora je navadno iz vodno hlajene jeklene konstrukcije. Pri manjših pečeh je enokomorna, to pomeni, da poteka taljenje in litje v isti komori, pri večjih pa je navadno dvokomorna, kjer potekata taljenje in litje v različnih komorah. Na sliki 1b je prikazana celo trikomorna izvedba, kjer je v sredinski komori indukcijska peč, levo je komora za klasično litje ingotov, desno pa komora za horizontalno kontinuirno litje.

Primeren vakuum se doseže navadno z **mehanskimi vakuumskimi črpalkami**, ki imajo hitrost črpanja do 5 000 L/s. Tlak v komori je v območju srednjega vakuum (10⁻³–10⁻¹ mbar). Pred začetkom

¹ Superzlitine so zlitine, ki imajo veliko trdnost pri povišani temperaturi ter so hkrati odporne proti visokotemperaturni koroziji. Med te spadajo zlitine na osnovi niklja, železa in niklja ter kobalta.



a)

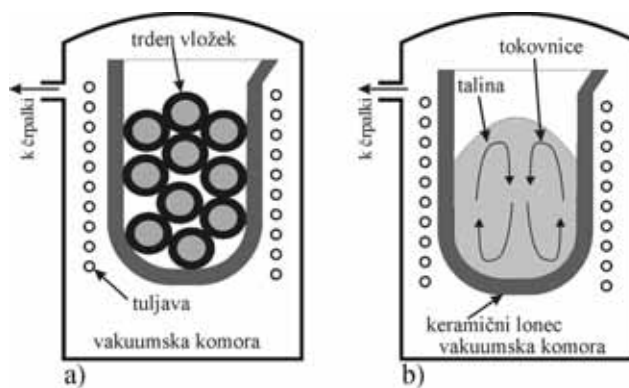


b)

Slika 1: Vakuumski indukcijski peči. a) Laboratorijska peč na Inštitutu za tehnologijo materialov, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru. b) Shematičen prikaz šesttonske vakuumske indukcijske peči, v kateri je mogoče vakuumsko litje ingotov in horizontalno kontinuirno litje (takšno peč imajo v podjetju Ross & Catherall, Sheffield, Velika Britanija).

vakuumiranja se peč založi s trdnim **vložkom**, ki je sestavljen iz deviškega vložka ter povratnega materiala. Pri izdelavi bakrovih zlitin je lahko vložek izjemoma tudi tekoč, kar bistveno zmanjša porabo energije za taljenje ⁽⁷⁾.

Talilni lonci so iz oksidne keramike, najpogostejše iz MgO , ZrO_2 in Al_2O_3 . Manjši lonci so iz enega dela, nekoliko večji pa so obzidani z opeko. Pogosto se lonci izdelajo tudi z nabijanjem (phanjem) ter se morajo sintrati na mestu pred prvim taljenjem. **Moč** indukcijskih peči se giblje v širokem razponu od 30 kW ter tudi do 10 MW. **Frekvenca** izmeničnega toka je lahko mrežna (50 Hz), srednja (nekaj tisoč hercov) in visoka (nad 10 000 Hz). Uporabljena frekvenca je odvisna od vložka, ki ga uporabljamo, ter od stopnje mešanja taline, ki jo želimo doseči. Velja, da je višja frekvenca primerna za taljenje drobnejšega vložka,

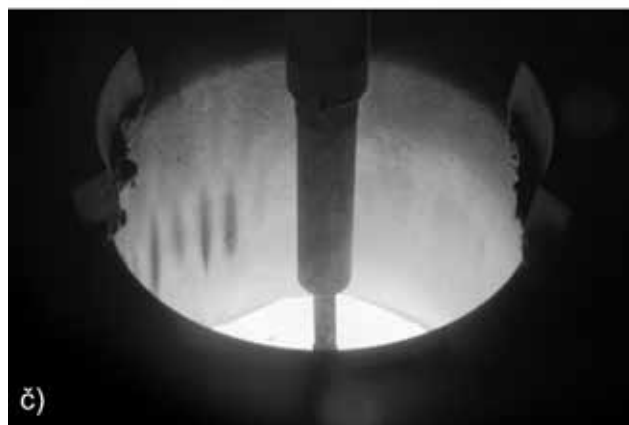


a)

b)



c)



č)

Slika 2: Vakuumska indukcijska peč: Shematičen prikaz delovanje vakuumske indukcijske peči. Taljenje poteka v vakuumski komori pri tlaku 10^{-3} – 10^{-2} mbar. a) V vložku nastanejo vrtnični tokovi, ki so zaradi kožnega pojava zgoščeni na površini vložka. b) Po stalitvi vrtnični tokovi povzročijo dobro mešanje taline. Talilni lonec srednjefrekvenčne vakuumske indukcijske peči c) pri segrevanju vložka v obliki palic in č) po stalitvi; v talino je potopljen termoelement.

medtem ko je mešanje taline pri višji frekvenci manj intenzivno.

3 PROCESI PRI TALJENJU

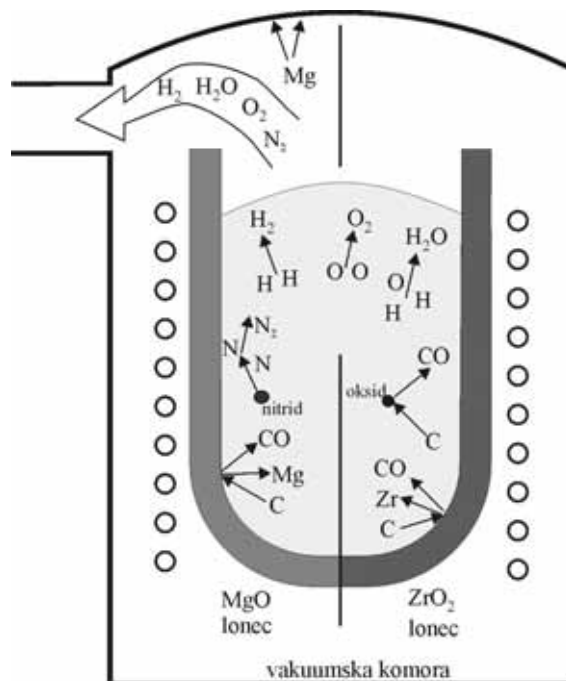
Pri segrevanju in taljenju vložka teče skozi oboje vodno hlajene tuljave (slika 2) izmenični električni tok. V tuljavi nastane spremenljivo in nehomogeno



Slika 3: Spreminjanje tlaka v vakuumski komori vakuumske indukcijske peči pri taljenju nikljeve superzlitine

magnetno polje, ki v električno prevodnem vložku inducira vrtnične tokove. Zaradi njih se sprošča Joulova energija, ki segreva vložek. Zaradi kožnega pojava (skin efekta) vrtnični tokovi tečejo pretežno po površini kosov, pri čemer je prodorna globina obratno sorazmerna frekvenci. Po stalitvi elektromagnetne sile povzročajo mešanje taline (slika 2 b). V novejšem času je eden izmed pomembnih ciljev napovedati in obvladovati tokove v talini, zato se uporabljajo računalniške simulacije, pri katerih je treba hkrati reševati Maxwellove in Navier-Stokesove enačbe. Mešanje taline ima več pozitivnih učinkov: raztapljanje zlitinskih elementov je hitrejšo, talina je bolj homogena, odstranjevanje plinov in nekovinskih vključkov je hitrejšo.

Procese, ki potekajo pri taljenju nikljevih superzlitin, lahko spremljamo, če merimo skupni tlak v komori kakor tudi koncentracijo elementov (slika 3). Najpomembnejši procesi potekajo med rafinacijo. Shematično jih prikazuje slika 4. Pri tem je temeljni proces nastajanje CO. Plin CO lahko nastaja z reakcijo ogljika z raztopljenim kisikom, ob redukciji oksidnih vključkov v talini ter pri reakciji ogljika z obzidavo peči. Tako se deleža ogljika in kisika v talini lahko močno zmanjšata. V začetku CO izhaja iz taline v obliki mehurčkov, pravimo, da talina vre. Vrenje je lahko tako močno, da izvrže talino iz lonca. Da bi to preprečili, je treba ob intenzivnejšem vrenju povečati tlak v komori. V zadnji stopnji rafinacije se CO izloča iz taline z desorpcijo s površine. Drugi raztopljeni plini (npr. vodik in dušik) se prav tako izločajo iz taline. Pri tem je koncentracija raztopljenega plina (npr. vodika) sorazmerna delnemu tlaku plina v komori (v primeru vodika delnemu tlaku H_2). To pomeni, da bo v talini tem manj raztopljenega plina, čim manjši bo tlak v komori. Nizek tlak v komori tudi olajša izparevanje lahkih elementov, zato lahko koncentracijo elementov, kot so Pb, Bi, Mg,



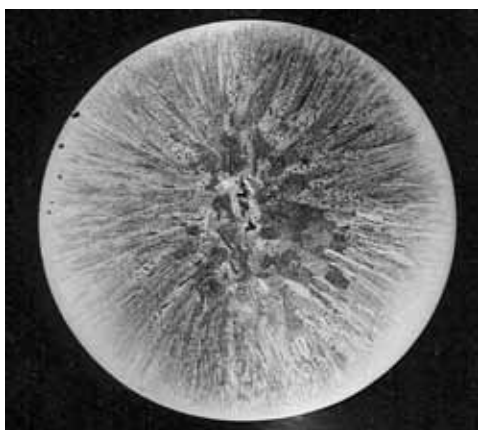
Slika 4: Shematičen prikaz procesov, ki potekajo pri rafinaciji nikljeve superzlitine, če jo talimo v loncu iz MgO oziroma ZrO_2

močno zmanjšamo. Zaradi redukcije oksidov z ogljikom se močno zmanjša tudi delež nekovinskih vključkov v talini, vendar njihovega deleža ne moremo povsem odpraviti. Namreč, ogljik reagira tudi z materialom lonca, zato postane le-ta na stiku s talino porozen, in delčki (oksidi) se luščijo v talino. Ko koncentracija kisika v talini pade pod določeno mejo, se dodajo reaktivni elementi.

To so elementi, ki tvorijo bolj termodinamsko stabilne okside, ki jih ogljik ne more reducirati (12). Preverjanju kemijske sestave sledi litje. Pri nikljevih superzlitinah je najpogostejše klasično litje drogov, ki imajo okrogel prečni prerez ter premer od 30 mm do 300 mm. V zadnjem času poteka intenziven razvoj kontinuirnega litja nikljevih in kobaltovih superzlitin,



Slika 5: Kokile za litje drogov



Slika 6: Makrostruktura ulitega droga. V sredini je lunke. Prevladujejo usmerjena kristalna zrna, le na sredi je nekaj enakoosnih.

medtem ko je kontinuirno litje bakrovih zlitin že dolgo standard.

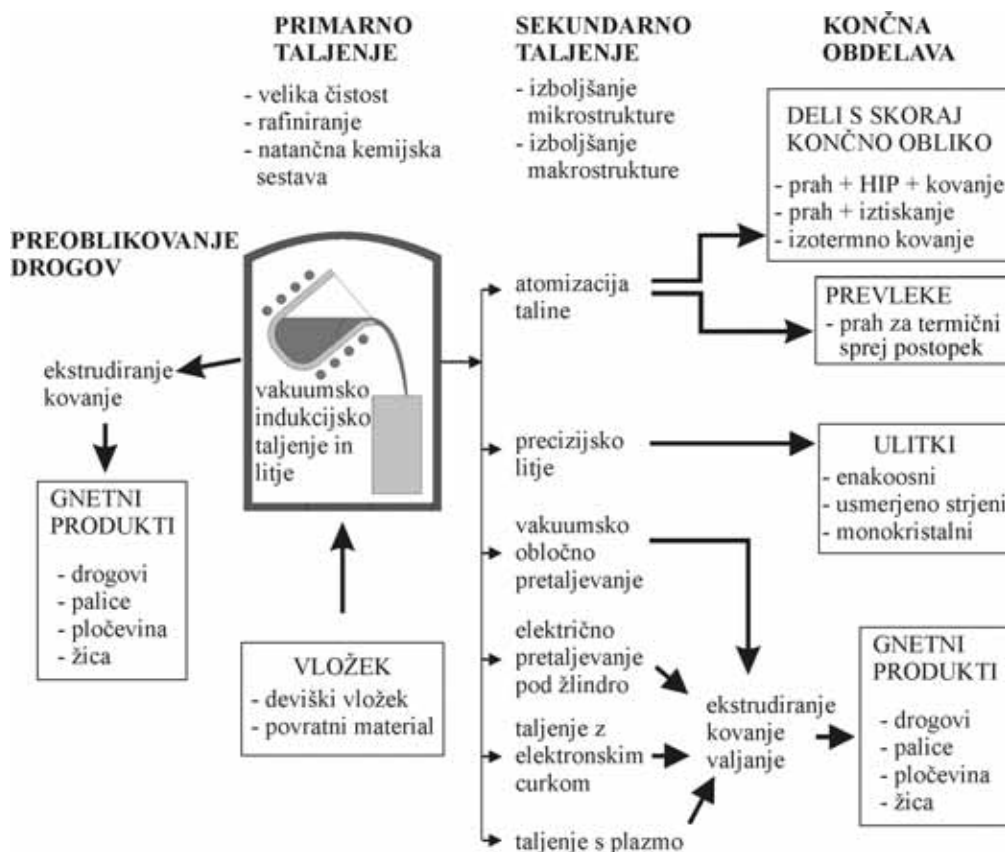
Pri klasičnem litju drogov je makrostruktura sestavljena iz grobih usmerjenih zrn z nekaj enakoosnimi v sredini (slika 6). V njej se pogosto pojavlja lunke, kjer se nahajajo nekovinski vključki in druge nečistoče. Kakovost takšnih ulitkov v glavnem ni zadostna za uporabo takoj po litju oziroma po kasnejšem preoblikovanju, temveč jih je treba še enkrat pretaliti (slika 7). Po sekundarnem taljenju lahko

talino atomiziramo, da dobimo prahove za prašno metalurgijo, ali precizijsko lijemo, da dobimo ulitke z ustrezno mikrostrukturo in lastnostmi. S postopki vakuumskega obločnega pretaljevanja, električnega pretaljevanja pod žlindro, taljenja z elektronskim curkom in taljenja s plazmo zlitino še dodatno rafiniramo, to pomeni, da odstranimo nekovinske vključke ter zmanjšamo koncentracijo plinov in drugih neželenih elementov. Po teh rafinacijskih postopkih zlitino preoblikujemo in dobimo produkte, ki jih lahko uporabimo za najzahtevnejše aplikacije.

4 OSNOVNE ZNAČILNOSTI VAKUUMSKEGA INDUKCIJSKEGA TALJENJA

Čistost taline. Pri taljenju v vakuumu preprečimo stik in reakcije z zrakom (s kisikom in z dušikom). Talina je čista, delež nekovinskih vključkov se močno zmanjša. Nadzorujemo lahko tlak in pline, ki se nahajajo v sistemu, uporabljamo lahko tudi varovalne pline, kot je npr. argon. Ulitki imajo bistveno boljše lastnosti, kot tisti, ki so bili taljeni na zraku.

Pospešitev rafinacije taline. Odstranitev raztopljenih plinov in izparljivih sestavin je v vakuumu mnogo učinkovitejša. Vakuum pospešuje razpad spojin, kot so oksidi in nitridi, in omogoča, da nekatere reakcije potečejo do konca (npr. dezoksi-



Slika 7: Značilnosti vakuumskega indukcijskega taljenja ter možni produkti

dacija). Omogoča pretaljevanje odpadnega materiala. Zlitinski elementi postanejo bolj učinkoviti, saj se ne vežejo v neželene spojine.

Induktivno mešanje homogenizira taline. Mešanje dviga reaktante do površine taline, kar pospešuje reakcije. Zagotovljen je izreden nadzor nad kemijsko sestavo. Omogoča izredno ponovljivost kemijske sestave in lastnosti.

Litje elektrod ali ingotov. Pri tem nastanejo kristalne in blokavne izceje zlitinskih elementov med strjevanjem. Strjevanje povzroči nastanek grobih kristalnih zrn, ki so neenakomerno velika, ter pojav lunkeja v sredini ingota.

Reakcije med talino in materialom lonca. Talina se onesnaži zaradi ponovne oksidacije zlitinskih elementov. Nastajajo vključki, čeprav v mnogo manjši meri kot pri taljenju na zraku.

V strokovni literaturi se za vakuumsko indukcijsko taljenje uporablja kratica VIM (iz angl. Vacuum Induction Melting). Za izvedenke VIM se uporabljajo še naslednje kratice:

VIM-VIDP: VIM with Vacuum Induction Degassing and Pouring (VIM z vakuumskim indukcijskim razplinjanjem in litjem)

VID: Vacuum Induction Degassing (vakuumsko indukcijsko razplinjanje)

VIM-HCC: VIM with Horizontal Continuous Casting (VIM s horizontalnim kontinuirnim litjem)

VIM-VCC: VIM with Vertical Continuous Casting (VIM z vertikalnim kontinuirnim litjem)

VIM-DS: VIM with Directional Solidification (VIM z usmerjenim strjevanjem)

5 SKLEPI

Vakuumsko indukcijsko taljenje se v industrijski praksi uporablja kot najfleksibilnejši postopek primar-

nega taljenja več kot petdeset let. Uporaba vakuuma omogoča izdelavo zlitin z natančno kemijsko sestavo, z majhnim deležem plinov in nekovinskih vključkov. Talimo lahko skoraj vse kovinske materiale, predvsem pa takšne, ki vsebujejo reaktivne zlitinske elemente. Izdelava teh bi bila pri taljenju na zraku praktično nemogoča, v vsakem primeru pa bolj neekonomična. Kakovost vakuumsko indukcijsko taljenih zlitin lahko še dodatno izboljšamo s sekundarnim taljenjem.

Glede na značilnosti vakuumskega indukcijskega taljenja lahko pričakujemo, da se bo postopek še dolgo uporabljal v industrijski praksi.

LITERATURA

¹S. Južnič: Zgodovina raziskovanja vakuuma in vakuumskih tehnik, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Ljubljana 2004, str. 107–108

²J. W. Pridgeon, F. N. Darmara, J. S. Huntington, W. H. Sutton: Principles and practice of vacuum induction melting and vacuum arc remelting, The metallurgical society of AIME, 1981, str. 201–216

³Heat Resistant Materials (ur. J. R. Davies), ASM International, 1997, 221–235

⁴S. J. Patel: A Century of Discovery, Inventors, and New Nickel Alloys, JOM, 2006, str. 18–20

⁵<http://web.ald-vt.de/cms/vakuum-technologie/anlagen/vimvidp/>

⁶C. Hays, Journal of materials engineering and performance 16 (6) (2007) 730–735

⁷H. Rupp, Metall, 42 (1988), 356–363

⁸H. B. Li, Z. H. Jiang, M. H. Shen, Journal of iron and steel research international 14 (2007) 3, 63–68

⁹A. Mitchell, A. Kawakami, S. L. Cockcroft, High temperature materials and processes 26 (2007) 1, 59–77

¹⁰R. Krein, A. Schneider, G. Sauthoff, Intermetallics 15 (2007) 9, 1172–1182

¹¹N. Nayan, K. S. Govind, Materials science and engineering 454 (2007), 500–507

¹²A. Rosina: Teorija metalurških procesov, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za materiale in metalurgijo, Ljubljana 1997, str. 157

LASERSKO REPARATURNO VARJENJE DUPLEKSNO ZAŠČITENIH ORODNIH JEKEL

Janez Tušek¹, Tadej Muhič², Matej Pleterski¹, Damjan Klobčar¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

²TKC, d. o. o., Trnovska 8, 1000 Ljubljana

POVZETEK

V delu opisujemo problematiko in razvoj na področju obladovanja vplivnih parametrov laserskega reparaturnega varjenja dupleksnih zaščitnih orodij za tlačno litje.

Laser repair welding of duplex-treated tool steels

ABSTRACT

The topic of the presented paper are the obstacles and the development of proper parameters for laser repair welding of duplex-treated tools for die casting.

1 UVOD

Orodja za tlačno litje so zelo pomembna v hitro razvijajočem se industrijskem svetu. Imajo velik vpliv na produktivnost dobrin, kot so deli avtomobilov, stekleni in polimerni izdelki ter razna ohišja.

Glede na okolje, v katerem orodja za tlačno litje uporabljamo, se pojavljajo tudi tipični razlogi za odpoved oziroma poškodbe le-teh. Glavni razlog poškodb orodij so termične razpoke, ki se pojavijo ob cikličnem obremenjevanju orodij. Drugi razlogi za odpoved so konstrukcijski, saj se pojavijo razpoke zaradi neustreznih oz. zahtevnih konstrukcijskih prehodov v orodjih. Nekaj odpovedi pa se zgodi tudi zaradi erozije površine na bolj izpostavljenih delih orodja. Orodja za brizganje plastike so sicer izpostavljena manjšim delovnim temperaturam, ampak so pri teh orodjih tlačni cikli toliko bolj zahtevni.

Za sanacijo poškodovanih delov orodij najpogosteje uporabljamo reparaturno varjenje. Z njim lahko ob optimalni tehnologiji pravočasno saniramo poškodbe in tako zmanjšamo škodo zaradi zastoja v proizvodnji.

Lasersko reparaturno varjenje se je uveljavilo predvsem za sanacijo manjših vrst obrabe, razpok in

drugih poškodb. Visoka gostota energije omogoča zelo natančno navarjanje poškodovanih mest, kar pomeni, da je obdelava navarov na predpisane mere po varjenju zelo enostavna in hitra. Navarjen sloj je mogoče obdelati ročno, kar omogoča reparaturo tudi tistih orodij, za katere orodjarna nima ustreznega orodja za potopno erozijo.

2 POSTOPKI ZAŠČITE ORODNEGA JEKLA

2.1 Nitiranje

Za zaščito orodij za tlačno litje najpogosteje uporabljamo različne postopke nitiranja, pri katerih utrjujemo površino železovih zlitin z dodajanjem dušika. Nitirana plast zaradi velikih zaostalih napestosti v difuzijski plasti izboljša obstojnost orodij pri termičnem utrujanju.

Termične razpoke pogosto ostanejo tako lokalizirane v beli plasti ali pa se zaustavijo na meji z difuzijsko plastjo. Nitiranje nam poveča odpornost proti utrujanju, obrabi in koroziji ter zmanjšuje probleme pri čiščenju in ločevanju ulitkov.

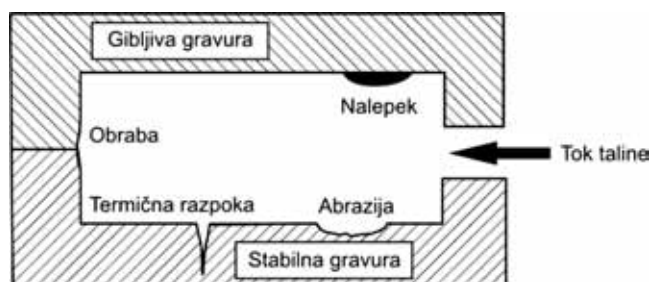
2.2 Oksidacija

Oksidacija je proces, pri katerem se ustvari oksidno plast, ki preprečuje sprijemanje in adhezijsko obrabo pri visokotlačnem litju.

Priporoča se, da se oksidacija izvrši pred prvim preizkusom orodja, saj imajo orodja zaradi kompliciranih oblik na nekaterih območjih velik koeficient trenja ter nezadovoljivo odvajanje toplote. Glavna prednost oksidacije je preprečevanje interakcij taline in površine orodja na delih, kjer so slabe mazalne lastnosti.⁽¹⁾

2.3 PVD-prevleke

Funkcija prevleke je, da zmanjša erozijo, sprijemanje in korozijo. Prevleke morajo biti trde, kemijsko inertne in temperaturno obstojne. Z uporabo trde PVD-prevleke se zmanjša čiščenje površine orodja, zmanjšajo se poškodbe orodij med izbijanjem, kar posledično pomeni zmanjšanje količine maziv. Za zaščito orodij za tlačno litje se predvsem uporabljajo prevleke: CrN, CrC, (Ti,Al)N.



Slika 1: Shematični prikaz vrste poškodb na orodjih za tlačno litje

2.4 Dupleksni postopki

Kombinacije prej opisanih postopkov dajejo najboljše rezultate. Z nitiranjem izboljšamo mehansko nosilnost jekla, medtem ko s trdno prevleko izboljšamo obrabno obstojnost proti eroziji, koroziji in sprijemanju litine na gravuro ⁽²⁾.

Prvi pogoj za uspešno kombinacijo nitrirane plasti in trde prevleke je kompatibilnost strukture in lastnosti posameznih plasti.

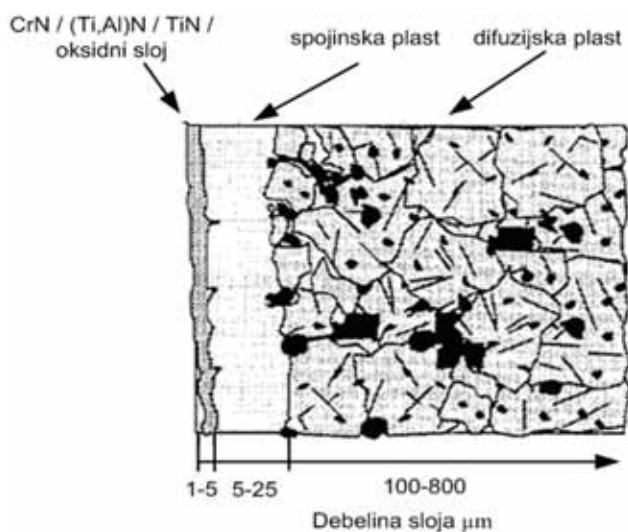
Tako je oprijemljivost trde prevleke odvisna od osnovnega materiala in strukture nitridne plasti (sestava in debelina bele plasti). Zelo pomembno je, da izberemo ustrezno prevleko, saj lahko le tako zagotovimo dobre adhezivne lastnosti prevleke in minimalne razlike pri modilih elastičnosti in termičnih razteznostnih koeficientih.

Vpliv PVD-prevlek na odpornost proti termičnemu utrujanju še ni popolnoma pojasnjen. Razloge za zapoznelo nastajanje in širjenje termičnih razpok lahko najdemo v tlačnih napetostih v prevlekah in visoki trdoti pri povišanih temperaturah. Vsekakor pa so razlike v termičnih razteznostnih koeficientih med prevlekami in osnovo glavni razlogi za odstopanje prevleke ⁽³⁾.

3 Nd:YAG-LASER

3.1 Značilnosti laserja

Pri Nd-YAG-laserju je kot laserska snov uporabljen trikrat ionizirani neodim, ujet v YAG-ov kristal, ki deluje kot gostitelj. YAG je kompleksen oksid s kemično zgradbo $Y_3Al_5O_{12}$. Količina kovinskih ionov itrija, nadomeščenih z Nd^{3+} , je od 1 % do 2 %. Emitirana valovna dolžina je 1,064 μm . Nd:YAG-laserji so sposobni emitirati svetlobni tok povprečne izhodne moči do nekaj 1000 W. V načinu CW (conti-



Slika 2: Mikrostruktura dupleksno površinsko obdelanega jekla

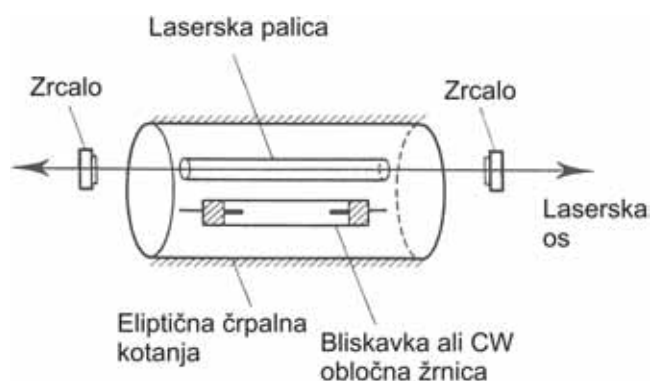
nous wave) delajo pri nekaj sto vatih, pri višjih močeh pa pulzno.

YAG-laser je štirinivojski sistem, kar se izraža v nizkem energijskem pragu za vzpostavitev inverzne populacije. Poleg tega ima YAG relativno veliko toplotno prevodnost, zato ga je mogoče intenzivno hladiti. Kontinuirni YAG-laserji so uravnavani s "Q-switchem" (akusto-optičnim modulatorjem), kar omogoča generacijo več tisoč pulzov na sekundo. Za še krajši čas pulzov pa se za pulziranje uporablja t. i. "mode-locking sistem", s katerim dobimo pulze dolžine razreda pikosekunde.

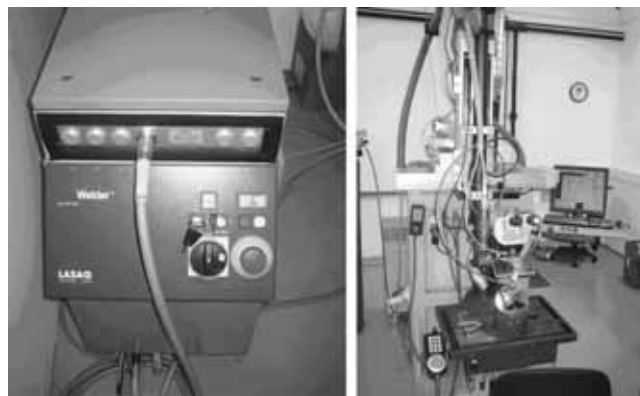
YAG-laserji se uporabljajo za pulzno varjenje prekrivnih spojev, točkovno varjenje, prebadanje (npr. dragih kamnov), reparaturno varjenje, označevanje in rezanje.

3.2 Opis laserskega varilnega sistema

Lasersko navarjanje smo izvajali na Nd:YAG-laserju švicarskega proizvajalca LASAG. Laser proizvaja svetlobo valovne dolžine $\lambda = 1064 \text{ nm}$, ki je po optičnih vlaknih prenesena do optike, s katero fokusiramo žarek. Na napravi lahko nastavljam trajanje laserskih pulzov od 0,1 ms do 10 ms. Laser



Slika 3: Shema eliptične laserske glave za trdninski laser ⁽⁴⁾



Slika 4: Laserski izvir Easy welder SLS CL 60 (levo) in strežni sistem CNC (desno)



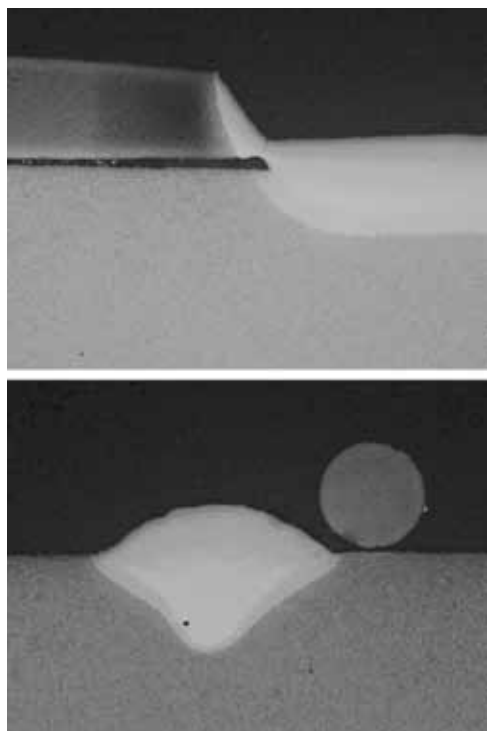
Slika 5: Shematski prikaz taljenja tanke žice pod laserskim žarkom ⁽⁵⁾

omogoča frekvence pulzov od 0,1 Hz do 500 Hz. Maksimalna energija pulza je 70 J.

3.3 Ročno lasersko varjenje

Varilec med laserskim varjenjem vodi žarek z ročno pozicionirno napravo in popolnoma ročno dovaja varilno žico na mesto varjenja. Pred varjenjem mora varilni operater na laserskem izviru določiti parametre žarka. Hitrost varjenja, ki jo uravnava z mehansko napravo in lego, ter hitrost dovajanja žice na mesto pretaljevanja pa mora varilec na podlagi izkušenj določiti med varjenjem.

Varilni operater mora ves čas skozi optično napravo opazovati mesto varjenja in pozicionirati varilno žico v sredino laserskega žarka. Premer žarka v gorišču mora biti vsaj 40 % večji od premera žice, da se tako izognemo varilnim napakam (neprevartvam, zlepom).



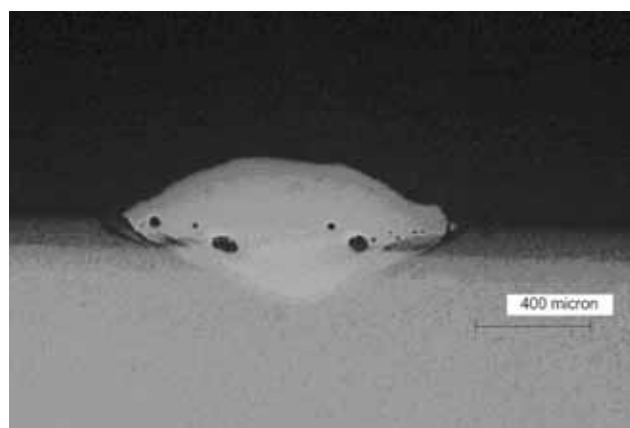
Slika 6: Metalografski prikaz taljenja tanke žice pod laserskim žarkom

4 LASERSKO REPARATURNO NAVARJANJE DUPLEKSNO ZAŠČITENIH ORODNIH JEKEL

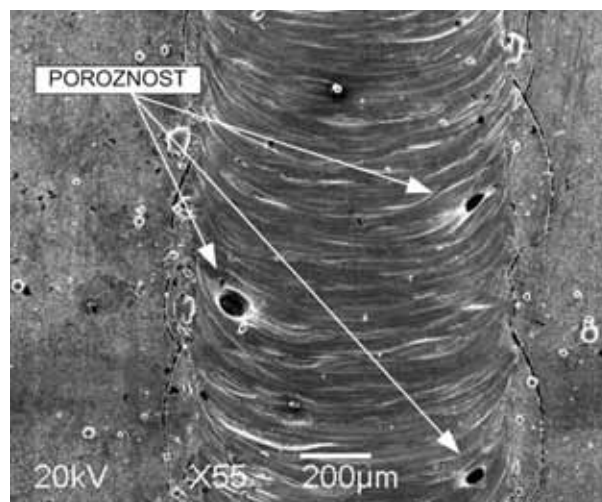
Varjenje nitriranih površin povzroča sproščanje dušika, kar posledično pomeni veliko število por v zvarnem spoju.

Poroznost se navadno formira na robovih zvarnega spoja. Pri varjenju oz. taljenju površine nitrirane plasti se tvorijo plini, ki se dvigajo z dna varilne kopeli. Zaradi narave laserskega varjenja nastaja hipno strjevanje taline, tako da ostanejo plini ujeti na robovih zvarne kopeli.

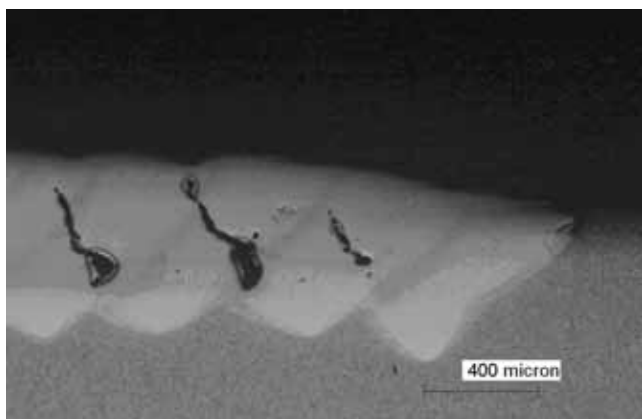
Pri varjenju nitriranih površin se pojavljajo tudi majhne vroče razpoke. Menimo, da se razlogi za nastanek teh razpok ravno pore. Razpoke se začnejo širiti iz por proti temenu zvara. Največkrat ga ne dosežejo. Ta vrsta napak se pokaže šele pri kasnejših obdelavah površine in je varilec med varjenjem ne more zaznati. Razlog za nastanek te vrste napake je izključno izbira neustreznih varilnih parametrov za dupleksno toplotno obdelano površino (prevelik vnos toplote ali prenizka hitrost varjenja).



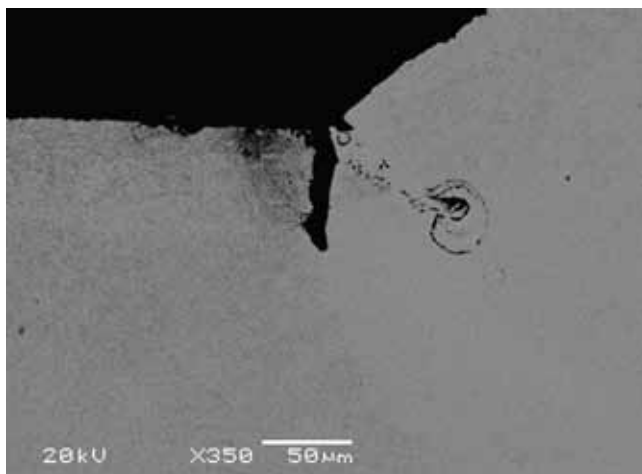
Slika 7: Metalografska slika prečnega laserskega navara nitrirane površine



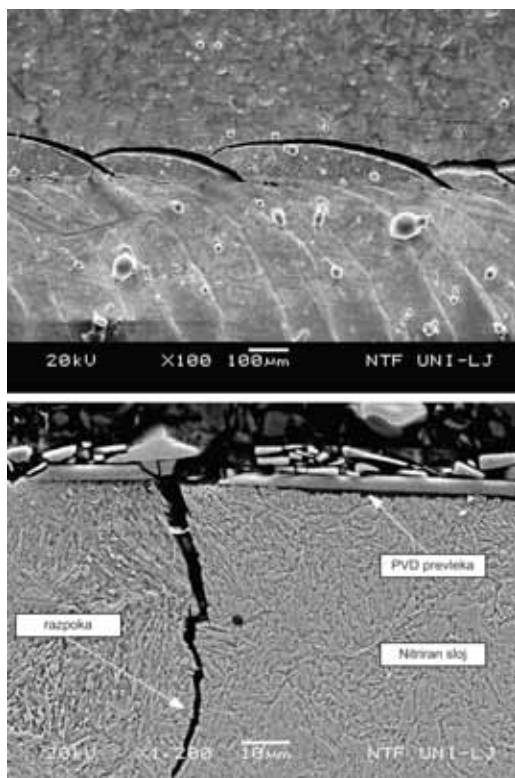
Slika 8: Teme navara na nitrirani osnovi



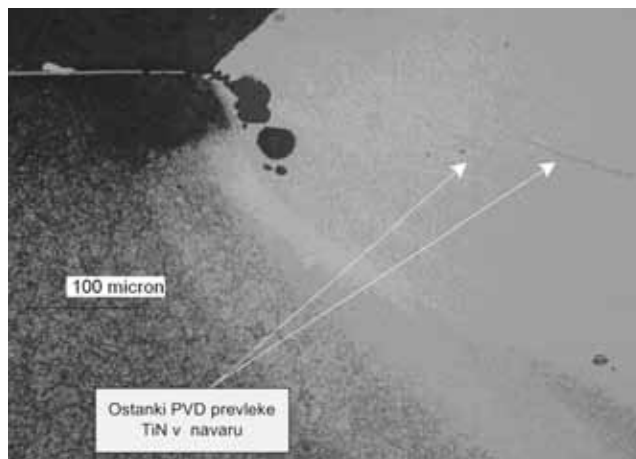
Slika 9: Metalografska slika širjenja razpoke iz pore



Slika 10: Razpoke ob zvarnem robu



Slika 11: Pojav razpok kot posledica neustreznega laserskega varjenja



Slika 12: Ostanki prevleke TiN v zvarnem spoju

Ob zvarnem spoju se pogosto pojavljajo tudi obrobne zajede, ki segajo do globine nitriranega sloja. Zajede so relativno široke in so zaobljenih oblik. Njihov nastanek je povezan z zmanjševanjem volumna taline pri ohlajanju zvarnega spoja.

Pri laserskem varjenju dupleksno toplotno obdelanih površin se pogosto pojavljajo vzdolžne in prečne razpoke. Nastajajo zaradi prevelikih nateznih in tlačnih napetosti med različnimi strukturami, ki imajo različne module elastičnosti in termične koeficiente.

Če je teh razpok veliko, obstaja verjetnost, da se po zelo kratkem času začnejo združevati. Pojavi se nevarnost hitrega luščenja površine, kar posledično pripelje do nesprejemljivih napak pri končnih izdelkih. Taka orodja je treba izločiti iz proizvodnje in ponovno popraviti.

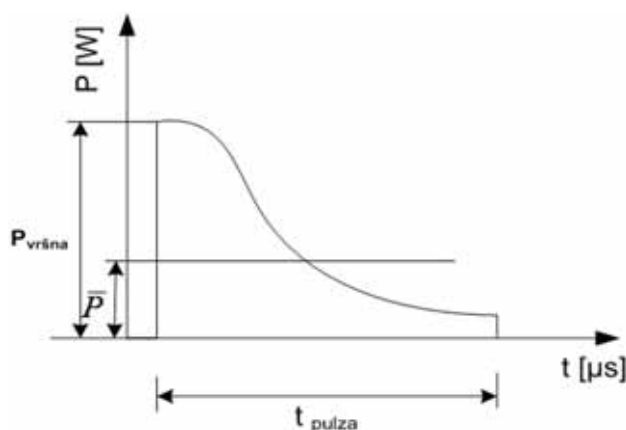
Vključki PVD-prevleke v zvarnem spoju se pojavljajo na orodjih, zaščitene s TiN. Sami vključki ne delajo težav, zaradi oblikovnih zahtev pa je treba njihovo prisotnost zmanjšati, saj povečujejo obrabo obdelovalnega orodja.

5 ANALIZA VPLIVNIH PARAMETROV NA KVALITETO LASERSKEGA NAVARA

Preučili smo različne parametre (trajanje pulza, moč pulza, frekvenca pulzov, premer žarka, hitrost varjenja, način varjenja, vrste dodatnega materiala), ki odločilno vplivajo na kvaliteto navarjenega sloja. Na podlagi serije eksperimentov smo prišli do naslednjih dognanj.

5.1 Oblika laserskega pulza

Opazili smo, da se povečanje poroznosti navarov pojavi pri navarjanju z večjimi močmi. Navari s padajočo obliko pulza imajo manjšo stopnjo poroznosti kot klasični pulzi pravokotnih oblik. Pulz s padajočo karakteristiko preprečuje hiter kolaps



Slika 13: Padajoča oblika laserskega pulza

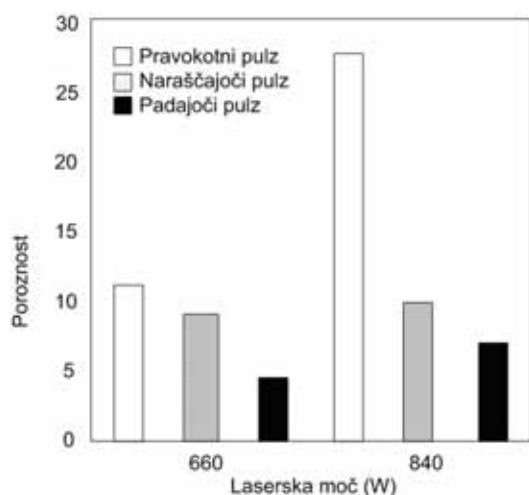
ključavnične luknje, saj s svojo obliko vpliva na počasno ohlajanje taline ter s tem daje raztopljenemu dušiku več časa, da zapusti talino.

Tako smo ugotovili, da postopno zmanjševanje moči pulza, kot je shematsko prikazano na sliki 13, znižuje stopnjo poroznosti v navarjenem sloju. Na povečanje vsebnosti plinskih vključkov v navarjenem sloju pa odločilno vpliva tudi previsoka energija laserskega pulza (slika 14).

5.2 Hitrost varjenja

Hitrost varjenja močno vpliva na vnos toplote in posledično na višino deformacij okolice navara. Pri premajhnih hitrostih varjenja se v navaru pojavljajo razpoke, ki so posledica strjevanja taline. Prav tako smo opazili povečano stopnjo razpok na dupleksno obdelanih površinah tik ob zvarnem robu.

Hitrost ročnega laserskega varjenja je odvisna od izkušenosti operatorja, saj mora ta določiti ustrezna razmerja med zmožnostjo dovajanja žice, frekvenco in ustrezno stopnjo prekrivanja pulzov.

Slika 14: Grafični prikaz poroznosti v odvisnosti od oblike pulza ⁽⁶⁾

5.3 Lasersko pretaljevanje površine

S predhodnim pretaljevanjem površine mesta varjenja se zmanjša poroznost v navarjenem sloju. Samo zmanjšanje poroznosti pri zahtevnejših orodjih ne zagotavlja ustrezne kvalitete površine.

Na sliki 15 je prikazano predhodno pretaljevanje površine nitriranega sloja. Opazimo lahko, da s pretaljevanjem popolnoma odstranimo nitrirano plast. Nekaj poroznosti, ki nastaja kot posledica raztapljanja nitrirane plasti, se pojavi le na začetku in na koncu pretaljene cone. Pričakovali smo, da bo navarjeni sloj na tako pripravljeni površini brez večjih napak.

Izkazalo se je, da to ni tako. Razloge za takšno stanje lahko iščemo v močnem brizganju taline pri dupleksno obdelanih površinah. Ob taljenju nitrirane plasti se začne raztopljeni dušik sproščati v obliki plina, kar povzroča brizganje taline iz cone taljenja.

Material obrizgov vsebuje visoko stopnjo nitridov in ostankov raztopljene prevleke. Če kasneje varimo tako površino, se ti nitridi ponovno raztapljajo in povzročijo napake v navaru. Tako lahko z načinom varjenja B pričakujemo ustrezno kvaliteto navara šele v drugem sloju.

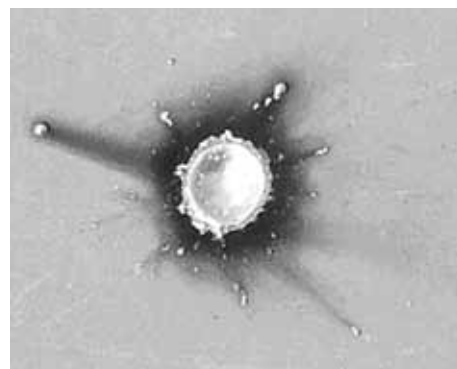
Zato smo razvili inovativen sistem navarjanja dupleksno obdelanih površin. Z novim postopkom



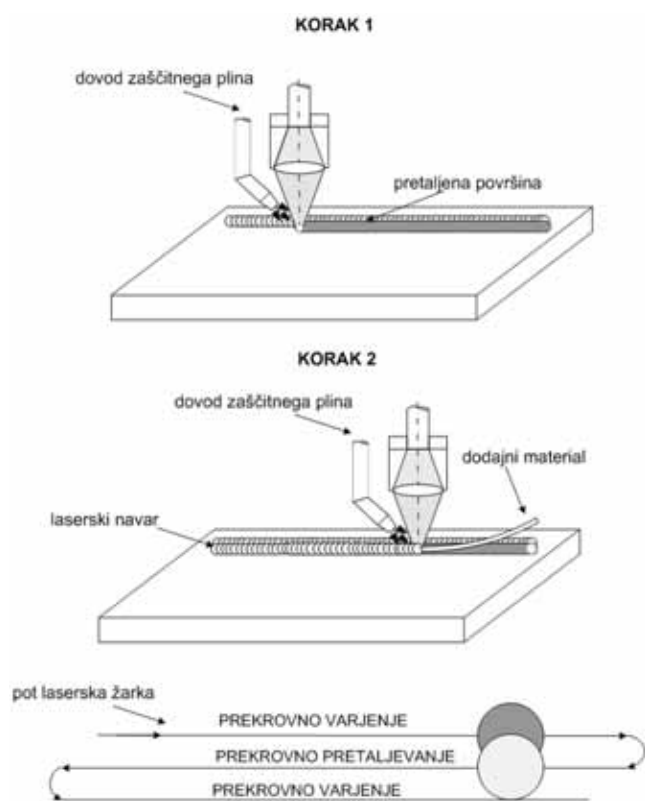
Slika 15: Predhodno pretaljevanje nitrirane površine



Slika 16: Dvoslojni navar na predhodno pretaljeni nitrirani površini



Slika 17: Brizganje taline pri varjenju orodja z visoko vsebnostjo nitridov

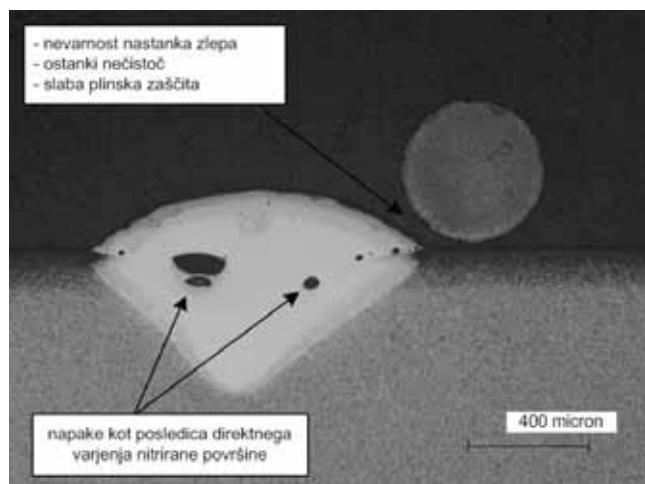


Slika 18: Optimiziran postopek varjenja površinsko dupleksno obdelanih jekel

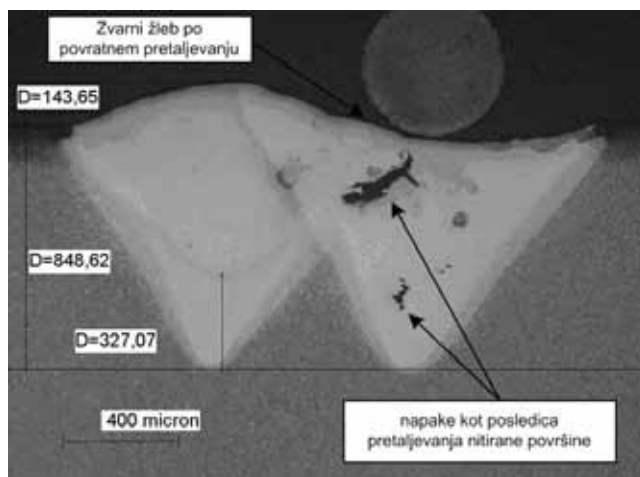
smo poroznost popolnoma odpravili. Zmanjšali smo čase varjenja in odpravili napake v laserskem navaru (zlepe, vključke).

Z novim načinom laserskega varjenja tako ohranjamo ozek pas površine navarjanja ves čas čist (brez obrizgov).

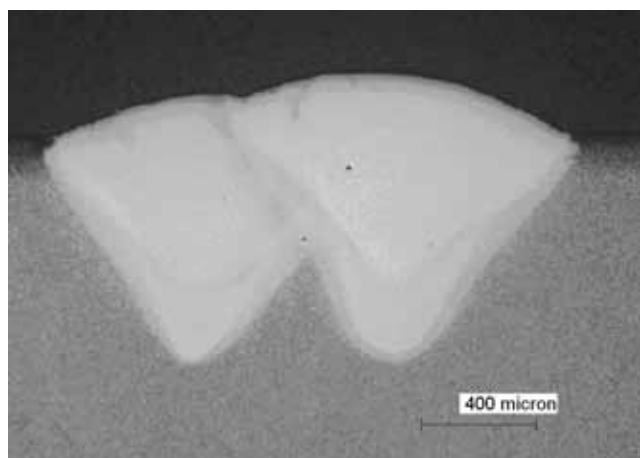
S sprotnim pretaljevanjem tako dosežemo stabilnejši prehod dodatnega materiala v navar. Z izboljšano obliko zvarnega žleba smo omogočili tudi izhod nečistoč z mesta varjenja. Predvsem pa smo zmanjšali turbulentnost dotoka zaščitnega plina na mesto



Slika 19: Prikaz direktnega varjenja brez pretaljevanja



Slika 20: Prikaz laserskega varjenja s povratnim pretaljevanjem



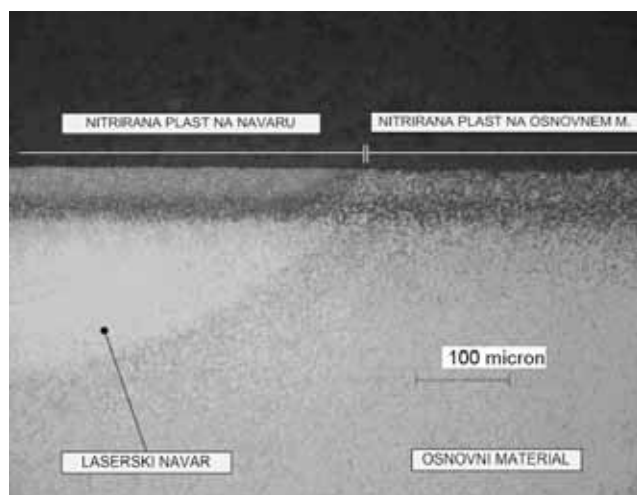
Slika 21: Metalografska slika kakovostnega laserskega navara na nitrirani površini

varjenja, kar posledično pomeni zmanjšano nevarnost onesnaženja navara zaradi atmosferskih vplivov.

6 MEHANSKA IN TERMIČNA OBDELAVA VARJENIH MEST ORODJA

Po uspešnem laserskem reparaturnem navarjanju sledi mehanska obdelava saniranega mesta orodja. Ta vključuje rezkanje, potopno erozijo ter končno poliranje. Želja orodjarjev je, da se orodju predvidena trajnostna doba po tako opravljeni reparaturi poveča vsaj za polovico. To lahko dosežemo z lokalnim nitriranjem (uporaba inhibitorja) oz. z nanosom prevlek na mesta, ki so bila sanirana.

Pri ponovnem nitriranju pa se izkaže za zelo pomembno ustrezna izbira dodatnega materiala v obliki laserske žice, saj sestava dodatnega materiala vpliva na proces tvorbe nitridnih plasti. Odločilno je to, da lahko izvajalec laserskega varjenja ob kroničnem pomanjkanju laserskega dodatnega materiala na svetovnem trgu samostojno izdelava istoimenski



Slika 22: Metalografski prikaz lokalnega plazemskega nitriranja navarjene površine orodja

dodajni material in s tem posledično izdela homogeno strukturo orodja.

7 SKLEP

S podaljševanjem predvidene trajnostne dobe orodij za tlačno litje se zmanjšujejo proizvodni stroški

podjetja. Ob uporabi dupleksnih postopkov površinske zaščite se lahko zagotovljena trajnostna doba poveča tudi za 200–300 % ⁽⁷⁾. Čeprav dodatne površinske zaščite orodij povzročijo zmanjšano varivost, lahko z obvladovanjem tehnologije laserskega reparaturnega varjenja uspešno saniramo poškodovane površine še dolgo po izteku predvidene dobe. Prepričani smo, da se bo povpraševanje po tovrstnih storitvah v prihodnosti povečalo, saj na trg prodira vse več tako toplotno obdelanih površin orodij.

LITERATURA

- ¹<http://www.tamcelik.com/eng/Tamcelik-isil-islem-oksidasyon-islemi.asp>
- ²Panjan P., Čekada M.: Zaščita orodij s trdimi PVD-prevlekami, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, 2005
- ³Pellizzari M., Molinari A., Straffellini G., Surface & Coatings Technology 142–144 (2001), 1109–1115
- ⁴Svelto O.: Principles of lasers; Plenum Press, NY, 1982
- ⁵Tušek J., Pompe K., IRT 3000, 1 (4) (2006)
- ⁶H. B. Kim, C. H. Lee, Science and Technology of Welding and Joining 4 (1999), 51–57
- ⁷Navinšek B., Panjan P., Urankar I., Cvahte P., Gorenjak F., Surface & Coatings Technology 142–144 (2001), 1148–1154

SANACIJA TERMORAZPOK NA ORODJIH ZA TLAČNO LITJE Z LASERSKO TEHNOLOGIJO

Matej Pleterski¹, Janez Tušek¹, Tadej Muhič², Klemen Pompe²

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

²TKC, d. o. o., Trnovska 8, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Varjenje in nekatere sorodne tehnike so zdaj edine poznane tehnologije, s katerimi lahko poškodovana orodja popravimo in ponovno uporabimo za delo. Med poznanimi varilnimi postopki lahko v praksi uporabimo nekaj obločnih postopkov, lasersko varjenje, pa tudi varjenje z elektronskim curkom. Od poznanih postopkov v največji meri uporabljamo varjenje TIG in v novejšem času lasersko reparaturno varjenje.

Repair of thermal cracks on tools for die casting using laser technology

ABSTRACT

Welding and some other similar techniques have so far been the only technologies suitable for repairing of damaged tools and for their consequential implementation for work. Among the well-known welding techniques, some of the arc techniques can be applied in production, as well as laser welding and electron beam welding. The most widely applied procedure is the TIG welding, and in the last years also laser repair welding.

1 UVOD

Svetovna oziroma globalna konkurenca v industriji končnih izdelkov zahteva, da proizvajalci znižujejo stroške na vseh ravneh, povečujejo kakovost in dvigujejo produktivnost. Sanacija poškodovanih in izrabljenih orodij je ukrep, s katerim lahko v veliki meri znižamo stroške v proizvodnji, povišamo produktivnost ter povečamo dobiček. Zato se v zadnjem času vedno bolj uporablja laserska tehnologija, ki daje prednost predvsem ozkemu lokalnemu delovanju toplotne energije, majhni toplotni vplivani coni okoli vara in zanemarljivim obrobnim zajedam.

Za lasersko varjenje lahko zapišemo, da je sploh ena izmed prvih industrijskih aplikacij laserja. Ta alternativna tehnologija daje nove možnosti obdelave, dodelave in sanacije, kjer je varjenje z drugimi varilskimi metodami oteženo ali celo onemogočeno.

Orodja za tlačno litje so izdelana iz kakovostnih jekel ter nato še toplotno obdelana. Ena izmed najpomembnejših karakteristik orodja je trdota. Pri orodjih za tlačno litje barvnih kovin mora biti *HRC* okoli 45. Za povečanje trajnostne dobe jih lahko cementiramo ali nitriramo in jim s tem povečamo površinsko odpornost proti obrabi. Ne glede na vrsto materiala, toplotno obdelavo in vrsto oplemenitenja površine orodja se ta med uporabo obrabljajo, poškodujejo in na njihovi površini nastanejo razpoke, ki segajo v globino. Z nadaljnjo uporabo se te razpoke večajo in na ulitkih puščajo sledi, ki pa za mnoge uporabnike niso sprejemljive (slika 1).

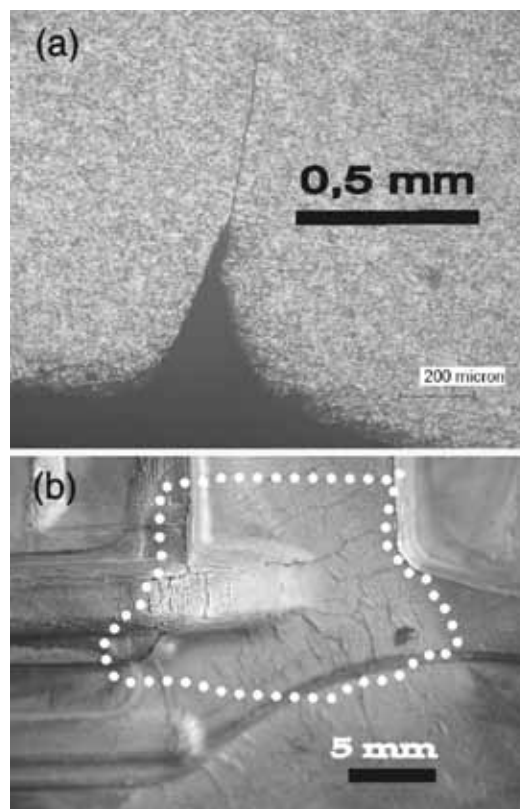
2 OPIS PROBLEMA

Orodja za tlačno litje barvnih kovin so med uporabo močno obremenjena z mehansko silo in s toplotno energijo. Zaradi teh obremenitev se orodja obrabljajo in razpokajo. Razpoke, ki jih imenujemo termomehanske, nastanejo na površini in se s časom širijo in poglobljajo v material orodja. Ko se razpoka poveča do te mere, da na ulitem izdelku vidimo napako oz. ta ogrozi njegovo funkcionalnost, moramo orodje sanirati.

Toplotne razpoke nastanejo zaradi temperaturnih šokov in velikih pritiskov taline na orodje. Med tlačnim litjem se dogodi, da je temperatura na površini kratek čas pod srednjo temperaturo orodja, tako da nastanejo natezne napetosti, ki privedejo do toplotnega utrujanja in do nastanka posameznih ali mrežasto razporejenih toplotnih razpok.

Na sliki 1a je prikazan del površine orodja, na katerem se je pojavila razpoka. Zaradi razpoke na orodju dobimo na površini ulitega izdelka hrapavo in ne popolnoma gladko površino, kar je razvidno s slike 1b.

Termične poškodbe so najbolj pogoste in najbolj delikatne poškodbe na orodju ter so v veliki večini vzrok drugih poškodb na vseh delih orodja. Pri procesu tlačnega



Slika 1: Prikaz toplotne razpoke na površini orodja (a) in njihov vpliv na površino ulitega izdelka (b)

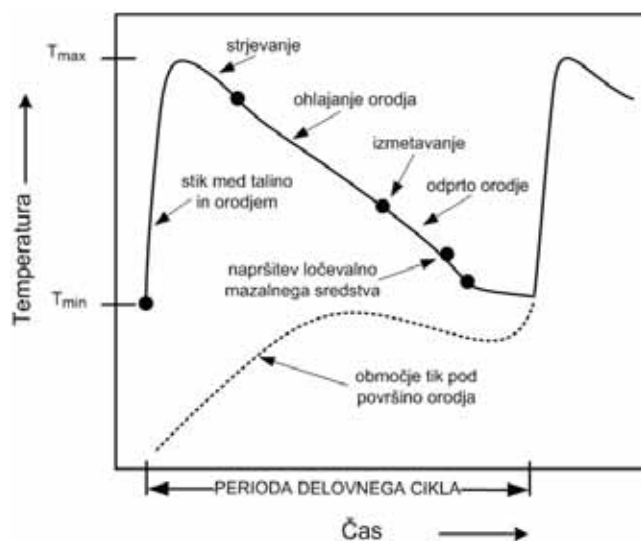
litja se pojavijo velika termična nihanja, t. i. termični šoki. Sprva priteče talina v ulivno votlino orodja s temperaturo od 650 °C do 720 °C, kar je za orodje prvi temperaturni šok. Po strjevanju se orodje odpre in temperatura začne padati; orodje doživi drugi temperaturni šok. Po odstranitvi odlitka se orodje ohladi na približno 350 °C, nato pa ga namažemo in ohladimo z mazalno emulzijo zaradi izmetavanja ulitka, pri čemer orodje doživi ponoven temperaturni šok; temperatura pade na približno (200 ± 30) °C. Nato se cikl ponovi, orodje se zapre ter napolni s talino. Material orodja je tako izpostavljen velikim termičnim raztezanjem, ki so bolj izrazita, čim bolj je nehomogena struktura materiala in čim bolj je orodje razgibano.

Pogosto se dogodi, da se v razpokah na orodjih nahaja kovina, ki jo lijemo (aluminij ali magnezij), kar sanacijo orodja še otežuje. Z laserskim žarkom pa lahko razpoko izžlebimo in s tem iz razpoke odstranimo nečistoče in kovino, ki jo lijemo. Z žlebljenjem do neke mere odpravimo tudi napetostno stanje okoli razpoke in orodje pripravimo za lasersko varjenje z dodatnim materialom.

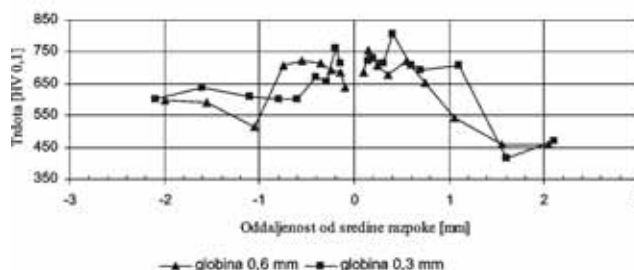
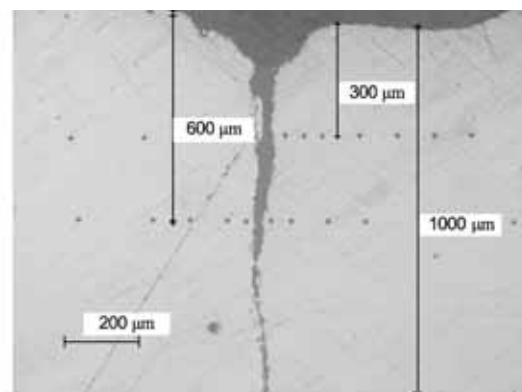
3 EKSPRIMENTALNI DEL

Rabljeno in razpokano orodje smo razrezali in iz nekaterih razpokanih delov izdelali makrobruse, da smo merili njihovo trdoto. Zanimalo nas je, kaj se dogodi z materialom orodja, ko je razpokano. Eno izmed pomembnih meril za oceno kakovosti materiala orodja je tudi trdota. Večina livarjev in orodjarjev, ki izdelujejo orodja za tlačno litje, se skoraj izključno pogovarjajo o trdoti, ki jo mora imeti orodje.

Z meritvami trdote smo ugotovili, da se le-ta okoli razpoke poveča. To je v splošnem poznano in teoretično tudi pojasnjeno. Večin raziskovalcev si povečanje trdote okoli razpoke razlaga z nakopičenjem dislokacij in s koncentracijo napetosti, ki nastanejo med uporabo orodja. Tretja razlaga za povišanje trdote pa temelji na difuziji legirnih elementov med ogrevanjem in ohlajanjem orodja. Predvsem krom, ki ima velik vpliv na trdoto, se s časom po orodju porazdeli neenakomerno in posledično je tudi trdota



Slika 2: Potek temperature na površini orodja in tik pod njo



Slika 3: Makroobrus razpoke na rabljenem orodju in označena mesta preko razpoke, kjer je bila merjena trdota

neenakomerno porazdeljena. Pri tem se moramo zavedati, da se s povišanjem trdote zniža žilavost.

Kot je razvidno z diagrama na sliki 3, dosegajo trdote HV ob razpoki tudi do 780 ($HRC = 62$). Področje, ki že vsebuje razpoko, je s tako visoko trdoto in posledično tudi povečano krhkostjo še bolj občutljivo za toplotne šoke. Pri nadaljnjem obratovanju takega orodja se razpoka še hitreje širi, postaja vedno globlja in širša. Poleg tega vanjo čedalje bolj vdira liti material, prihaja do abrazije in adhezije. Tedaj v razpoki pogosto ostajajo odtrgani koščki odlitkov, tudi po izmetu iz orodja. Vse skupaj vodi do nesprejemljivih odlitkov, orodje pa pri nadaljnjem obratovanju v takem stanju počasi po celotni globini. Tako poškodovana orodja se navadno sanirajo (če je sanacija sploh še stroškovno upravičena) po postopku TIG s predgrevanjem, zajede pa se nato popravijo z laserjem. Pri takšni sanaciji je potrebno veliko mehanske in toplotne obdelave.

Pri pripravi orodja za varjenje moramo razpoko izžlebiti. Najkvalitetnejše bi vsekakor bilo rezkanje utrjenega območja ob razpoki. Tako pripravljen žleb bi nato samo pretalili pri navadnih varilnih parametrih in ga pri teh parametrih tudi zavarili. Material se pri tem ne bi utrdil in trdota zvara bi bila enaka trdoti osnovnega materiala. V praksi se razpoke rezka zelo redko, še to navadno le predele razpok, kjer je odneseno veliko materiala in v notranjosti ostajajo kosi litine. Ročno rezkanje pa je prezahtevno (nevarnost poškodbe gravure), časovno potratno in pušča relativno velik žleb, ki pa ga je nato treba zapolniti.

Pri sanaciji bi poleg rezkanja omenili še varjenje razpok z različnimi materiali. Z dodajanjem mehkega materiala v koren zvara (notranjost žleba) bi ugodno vplivali na trdoto, saj kljub utrjevanju oz. zakalitvi zvar ne bi dosegel previsoke trdote. Poleg tega bi po dodajanju močno znižali visoko trdoto ob zvarnem žlebu, zvar pa bi pridobil tudi na žilavosti, kar bi zaviralo širjenje razpoke. Temenski zvar bi

opravili z materialom, primernim osnovnemu, kar bi verjetno občutno izboljšalo učinkovitost sanacije ter s tem povečalo cikle med reparaturami.

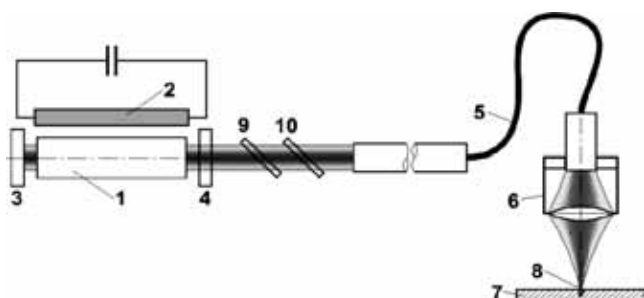
4 ŽLEBLJENJE IN VARJENJE RAZPOK

4.1 Žlebljenje razpok

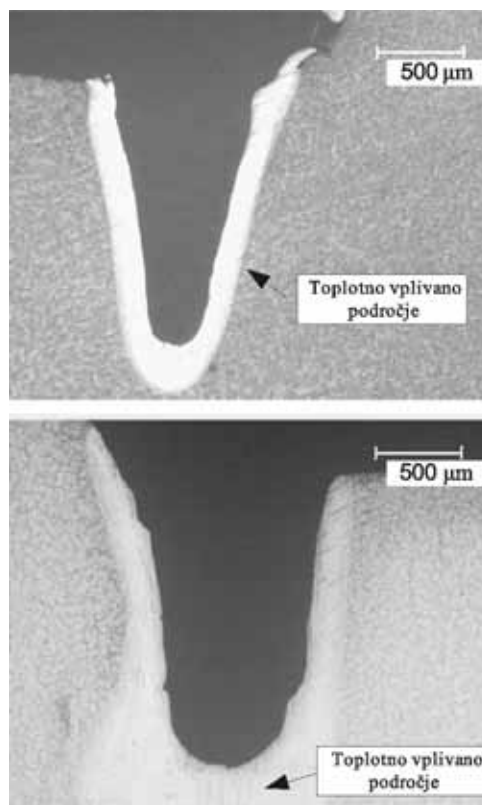
Če želimo razpoko izžlebiti z laserskim žarkom, moramo izbrati parametre z visoko gostoto energije v fokusu laserskega žarka. Material, tj. jeklo, je treba upariti in ga odstraniti iz razpoke. Na sliki 4 je shematsko prikazana laserska naprava, ki se zdaj največ uporablja za sanacijo razpok na orodjih za tlačno litje barvnih kovin. To je pulzni Nd-YAG laser, ki omogoča varjenje in žlebljenje razpok v različnih legah in na zapletenih površinah orodja, ker laserski žarek lahko vodimo po optičnem vlaknu, kar pomeni poljubno po prostoru.

Za žlebljenje je potrebna gostota energije nad 10^{10} W/m². To dosežemo z nastavitvijo visoke moči na laserskem izviru in izbiro leče s kratko goriščno razdaljo (posledično je manjši premer fokusirane točke na obdelovancu). Na začetku se nastavi fokus žarka na površino, lahko pa tudi malo pod njo (0,5 mm) in se ga med žlebljenjem še spušča. Ugodno je, da je porazdelitev energije v žarku Gaussova s čim manjšim raztrosom okoli sredine žarka. Za žlebljenje je takšna porazdelitev energije prednost, za varjenje z dodatno okroglo žico pa ni najprimernejša.

Na sliki 5 sta prikazana dva makroobrusa z izžlebljenima razpokama, ki sta nastali na njegovi površini med uporabo orodja za tlačno litje barvnih kovin. Z laserskim žarkom smo uparili del osnovnega materiala okoli razpoke, vse nečistoče in material, ki se je nahajal v razpokah. Tako izdelamo zvarni žleb za varjenje. Poleg tega se s toplotno lasersko energijo, ki učinkuje na material okoli razpoke, nekoliko odpravi zaostale napetosti, kar ugodno vpliva na napetostno stanje v orodju. Slabost pa je v tem, da se področje okoli izžlebljene razpoke, kar je razvidno s slike 5, med žlebljenjem raztali in nato zelo hitro ohladi ter strdi, kar močno poveča trdoto. To področje se med varjenjem ponovni raztali in delno razmeša z dodatnim materialom. Po varjenju se "relativno" počasi ohlaja, kar pomeni, da ne dobimo martenzitne strukture.



Slika 4: Shematski prikaz naprave za lasersko varjenje: 1 – aktivni medij (Nd:YAG-kristal) za ustvarjanje laserskega žarka, 2 – bliskovna luč, 3 – neprepustno zrcalo, 4 – polprepustno zrcalo, 5 – optični kabel, 6 – fokusirni optični sistem, 7 – varjenec, 8 – fokus laserskega žarka, 9 – sistem za časovno delitev žarka, 10 – sistem za energijsko delitev žarka

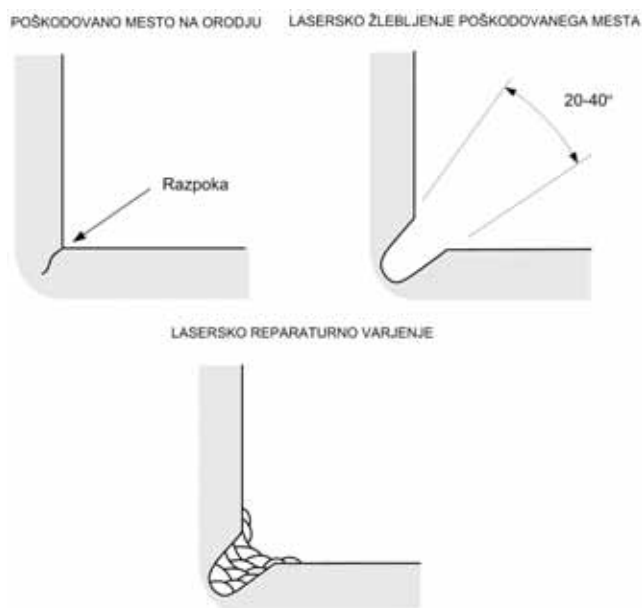


Slika 5: Prikaz dveh makroobrusov izžlebljenih razpok na površini rabljenega orodja, na katerih je tudi vidno toplotno vplivano področje (TVP)

4.2 Izbira dodatnega materiala

Kemična sestava zvara je odločilnega pomena za njegove mehanske lastnosti in s tem tudi vpliva na trajnostno dobo reparaturno varjenega orodja. Na kemično sestavo vara pa vpliva sestava dodatnega materiala, sestava osnovnega materiala in temperatura segretja osnovnega in dodatnega materiala med varjenjem oziroma varilni parametri. Dodatni material se mora optimalno mešati z raztaljenim osnovnim materialom. O optimalnem razmešanju govorimo, kadar je to minimalno in zadosti visoko, da ne nastane luščenje vara iz osnovnega materiala. Poleg mehanskih lastnosti mora dodatni material zagotoviti visoko čistočo vara in ne sme povzročati poroznosti in lunkejev ali drugih napak v varu. Orodna jekla so s svojo visoko trdoto še posebno občutljiva za lome v bližini nečistoč in por. Var mora imeti tudi primerne lastnosti za nadaljnjo mehansko obdelavo. Tu moramo dodati še to, da je obdelava laserskih varov na orodjih mnogo bolj preprosta kot obdelava varov, izdelanih s postopkom TIG.

Pri varjenju TIG v splošnem velja, da naj bi bila kemična sestava dodatnega materiala podobna osnovnemu. Pri laserskem reparaturnem varjenju pa ni tako. V primeru dodajanja materiala, enakega osnovnemu, dosežemo občutno višjo trdoto vara, kot jo ima osnovni material (pribl. HV 50–100). To je posledica zapletenih metalurških procesov, ki se odvijajo v majhnem volumnu taline in izredno kratkem času (pribl. 6 ms) segrevanja in pri hitrem ohlajanju. Zaradi majhne količine taline in velikega



Slika 6: Shematični prikaz laserskega reparaturnega varjenja in žlebljenja

gradienta temperature pride tako do prekomerne zakalitve raztaljenega materiala. Da bi se temu problemu izognili, uporabljamo pri laserskem reparaturnem varjenju dodatne materiale, ki imajo znižano vrednost ogljika in zvišano vrednost kroma ter molibdena glede na osnovni material.

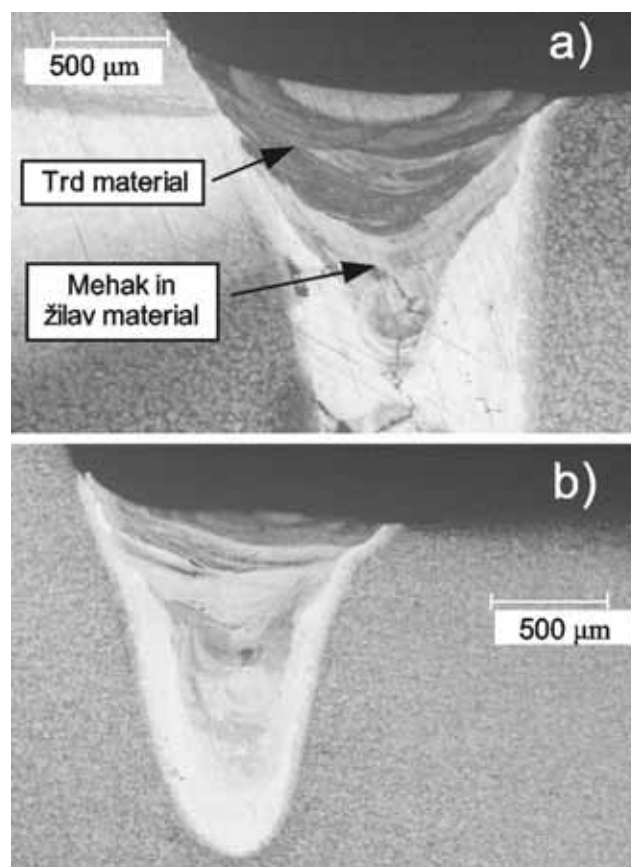
4.3 Varjenje izžlebljenih razpok

Izžlebljene razpoke nato zavarimo. Parametre laserskega žarka določimo na laserski napravi. Prilagojeni morajo biti velikosti izžlebljenega utora in premeru žice, ki jo uporabimo. Najpomembnejša parametra sta moč in čas trajanja laserskega bliska. Premer žarka v žarišču pa določimo na laserskem optičnem sistemu (slika 4).

V splošnem razpoke varimo z dodatnim materialom ene kemične sestave, včasih pa za varjenje razpok uporabimo dva različna materiala (slika 7). Za koren vara (tj. za varke v spodnjem delu izžlebljene razpoke) uporabimo mehak in žilav material, da preprečimo nastajanje novih razpok in širjenje starih, ki so morda še ostale v notranjosti orodja. Vrhnje (temenske) varke pa varimo s tršim materialom, da po varjenju dobimo na površini saniranega orodja ustrezno trdoto.

5 SKLEPI

Sklepamo lahko, da je laserski žarek zelo primerno sredstvo za sanacijo razpokanih orodij in da z njim lahko izvajamo zelo ustrezno tehnologijo. Z ustreznimi parametri laserskega žarka je mogoče razpoko izžlebiti ter tako



Slika 7: Makroobrus zavarjene razpoke z različnima dodatnima materialoma (a) in razpoke, zavarjene z enim dodatnim materialom (b)

odstraniti utrujeno območje materiala. Tak žleb se nato zavari, kvaliteta zvara pa je v veliki meri odvisna tudi od izbire dodatnega materiala. Razvoj reparaturnega laserskega varjenja je bistveno pripomogel k zmanjšanju stroškov vzdrževanja orodij in podaljševanju njihove trajnostne dobe, prav tako pa se je zmanjšal tudi izpad proizvodnje zaradi poškodovanih orodij v livarnah, pri preoblikovanju materialov in v industriji umetnih snovi.

6 LITERATURA

- ¹Dawes C.: *Laser welding*; Abington Publishing, Abington, 1992
- ²Vollrath K., Der Praktiker 55(9) (2003), 276–281
- ³Matsunawa A., El-Batahy A., Zaghoul B.: *Laser beam welding of lap joints of dissimilar materials*; Transactions of J W R I, 27, (1998) 2, str. 13–19
- ⁴Brockmann R. Honekamp M., Dickmann K., Meier S., Letsch H., Matthes K.-J., Schweißen & Schneiden, 53(9) (2001), 596–603
- ⁵Duley W. W.: *Laser welding*; John Wiley & Sons, Inc., NY, 1999
- ⁶Thompson S.: *Handbook of mould, tool and die repair welding*; Abington Publishing, Cambridge, 1999

ANODNI IONSKI IZVIR

Miha Čekada^{1,2}, Markus Kahn², Wolfgang Waldhauser²

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

²Joanneum Research, Laser Center Leoben, Leobner Str. 94, 8712 Niklasdorf, Avstrija

POVZETEK

Anodni ionski izvir je konstrukcijsko preprosta naprava z dvema katodama in eno anodo, ki omogoča oblikovanje ionskega curka. Če za delovni plin uporabimo argon, je naprava primerna za jedkanje podlag, z uporabo nižjih ogljikovodikov pa lahko nanašamo prevleke diamantu podobnega ogljika (DLC).

Anode layer source

ABSTRACT

The anode layer source is from the construction point of view a simple device with two cathodes and one anode. It enables the formation of an ion beam. If argon is used as working gas, the device is used for ion etching of surfaces. Using low hydrocarbons, diamond-like carbon coatings (DLC) can be deposited.

1 UVOD

Ionski izviri so vakuumski tehniki zelo razširjeni. Uporabljamo jih za različne aplikacije: čiščenje površin, postopno odstranjevanje plasti (globinska profilna analiza), ionska spektroskopija (SIMS, ERDA), litografija, ionska implantacija. Osnovni princip je v tem, da dovajamo izbrani plin, ki ga v izviru ioniziramo, izhajajoči ionski curek pa ima želeno energijo oz. energijsko porazdelitev.

Ena aplikacija, na prvi pogled eksotična, pa je pogon vesoljskih plovil. Zanimivo je, da je prav ta aplikacija dala velik zagon razvoju ionskih izvirov v 60-ih letih. Takrat so potrebovali sistem za majhne

korekcije orbit satelitov, ki bi imel dovolj majhno porabo goriva, da bi lahko deloval več let. Ker je bil takrat vrhunec hladne vojne, je razvoj potekal vzporedno v ZDA in v tedanji Sovjetski zvezi ⁽¹⁾. V ZDA so razvili t. i. Kaufmannov ionski izvir, ki je danes dobro poznan tudi v vakuumski tehniki. Ruski izdelek, danes ga poznamo pod imenom anodni ionski izvir (*anode layer source*, ALS), pa je ostal precej neopazen in se je v vakuumski tehniki pojavil šele nedavno.

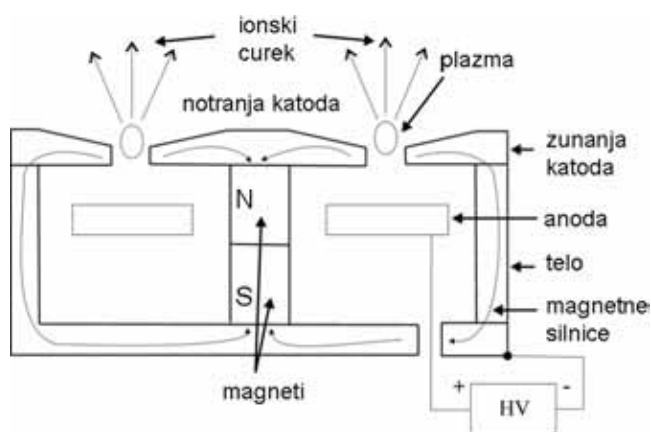
2 OPIS NAPRAVE

Anodni ionski izvir je v osnovi zelo enostavna naprava in v grobem spominja na magnetron (slika 1). Lice naprave sestavljata dve plošči, ki ju ločuje nekaj milimetrov široka reža, imenovana katodna reža. Obe plošči sta na negativnem potencialu, ploščo znotraj reže imenujemo notranja katoda, ploščo zunaj reže pa zunanja katoda. Namesto podolgovate geometrije je lahko reža tudi krožne oblike, ionski izvir pa s tem krožno simetričen. V vsakem primeru reža tvori zaključeno zanko.

Prečni prerez naprave prikazuje slika 2. Zgoraj sta obe katodi: notranja v sredini slike in zunanja na obeh robovih. Pod režo leži anoda, ki tako kot katodna reža oblikuje zaključeno zanko (nekakšen razpotegnjen prstan). Spodnji ploskvi obeh katod in zgornja ploskev anode so vzporedne. V vzdolžni osi naprave, med notranjo in zunanjo katodo, so močni magneti (bodisi permanentni ali navitje), ki ustvarjajo magnetno polje. Silnice potekajo od magnetov preko zunanje katode, katodne reže in notranje katode nazaj do magnetov. Konfiguracija magnetnega polja je tako zelo podobna



Slika 1: Fotografija anodnega ionskega izvira ⁽²⁾

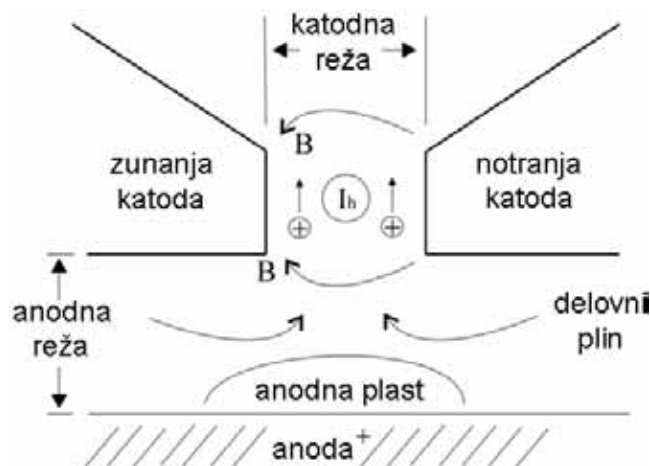


Slika 2: Prečni prerez anodnega ionskega izvira

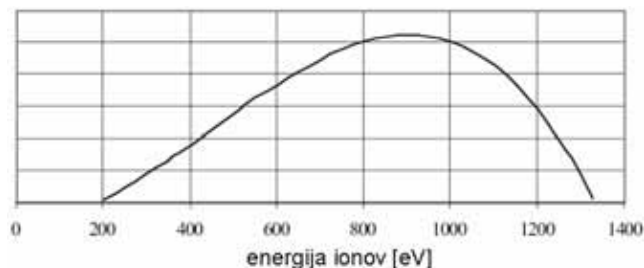
kot v magnetronu. Delovni plin dovajamo v prostor za anodo, kjer ga s primernimi razvodi usmerimo v prostor med anodo in katodo, tako da je pretok plina čim bolj enakomerno razporejen vzdolž reže.

Poglejmo si področje med katodo in anodo nekoliko podrobneje (slika 3). Katoda, narejena je iz magnetnega železa, je ob katodni mreži oblikovana konično, tako da je magnetna poljska gostota v reži čim večja. V anodni reži, tj. nekaj milimetrov debelo področje med katodo in anodo, pa je močno električno polje, ki ga napajamo z enosmerno napetostjo. V prehodu iz katodne v anodno režo sta vektorja magnetne poljske gostote in električne poljske jakosti pravokotna. Elektron, ki zapusti katodo, se pospeši proti anodi, magnetno polje pa obrne njegovo smer gibanja v smeri katodne reže. Podobno kot pri magnetronu torej dobimo močan tok elektronov v zaključeni zanki.

Pri ustreznem električnem potencialu (spodnja meja okoli 1000 V) in ustreznem pretoku delovnega plina (velikostnega reda 10 sccm) se prižge plazma. Prej omenjena zaključena zanka toka elektronov omogoča visoko stopnjo ionizacije. Značilna pot atoma (molekule) delovnega plina je torej naslednja. Atom pride v sistem skozi anodno režo. Ko vstopi v področje plazme, se ionizira in se začne pospeševati proti katodi. Del ionov trči v katodo, del pa zapusti sistem skozi katodno režo. Ionski curek ima obliko katodne reže, torej zaključene zanke, in ima zato v prerezu dva maksimuma⁽³⁾. Curek se divergentno širi v prostor, lateralno razširjanje pa lahko omejimo z vbrizgavanjem elektronov v curek, s čimer ga nevtraliziramo. To naredimo z elektronskim topom, ki ga vgradimo poleg anodnega ionskega izvira. Če so tarče prevodne in divergenca curka ni pomembna, elektronskega topa ne potrebujemo. Uveljavljeno poimenovanje je kolimirani način (z uporabo elektronskega topa) in difuzni način.



Slika 3: Detajl katodne reže



Slika 4: Značilna energijska porazdelitev izstopajočih ionov. Pospeševalna napetost je bila 1500 V⁽³⁾

Stopnja ionizacije ni homogena, temveč je največja v tankem področju tik ob anodi, ki ga imenujemo anodna plast. Od tod tudi ime naprave *anode layer source*, dobesedno *izvir z anodno plastjo*. Pomembna posledica nehomogenosti stopnje ionizacije je v tem, da je hitrostna porazdelitev izstopajočih ionov zelo široka, tako rekoč od nič do energije, ki ustreza pospeševalni napetosti (slika 4). Atom, ki v sistem prispe blizu anode, se bolj pospeši od atoma v bližini katode. Vrh energijske porazdelitve je približno na polovici energije, ki ustreza pospeševalni napetosti.

Pomembna prednost naprave je robustna konstrukcija, brez komponent, kjer po navadi pričakujemo težave (giblivi deli, žarilne nitke, ekstrakcijske mrežice itd.). Naprava omogoča tudi dolgotrajno delovanje v kisikovi atmosferi. Edini element, ki se po dolgotrajnem delovanju izrabi, je katoda, menjava pa je enostavna. Izraba je posledica razprševanja katode, razpršeni kovinski ioni pa lahko kontaminirajo ionski curek. Z ustrezno geometrijo katode lahko ta delež zmanjšamo do te mere, da je kontaminacija zanemarljiva. Pri delu z ogljikovodiki pride do nanašanja ogljikove plasti na katodo, s tem pa se poslabša karakteristika naprave. Rešitev je preprosto vpust inertnega plina v napravo za nekaj minut in ioni inertnega plina odjedkajo naneseo ogljikovo plast, tako da je površina katode spet kovinsko čista.

3 UPORABA

Karakteristike ionskega curka določamo s pospeševalno napetostjo in pretokom delovnega plina. To je lahko inertni plin (večinoma argon), široka paleta reaktivnih plinov (npr. C_2H_2 , SiH_4 , tudi O_2) ali kombinacija obeh. Tak primer je nanašanje diamantu podobnega ogljika (DLC), dopiranega s silicijem⁽⁴⁾. Pline lahko tudi dodatno uvajamo direktno v vakuumsko posodo. Še ena možnost je sočasna uporaba anodnega ionskega izvira in katere od drugih tehnik, npr. magnetronskega naprševanja.

Danes se anodni ionski izvir največkrat uporablja za čiščenje podlag. Zaradi visoke energije ionov (značilno okoli kilovolta) je čiščenje zelo intenzivno. Da očistimo podlage za standardni nanos PVD-plasti,

je dovolj le nekaj minut čiščenja z argonom. Če uporabimo tudi elektronski top, se izognemo težavam z nabijanjem neprevodnih podlag.

Velike možnosti pa se odpirajo pri uporabi anodnega ionskega izvira za nanos prevlek. Z uvajanjem ogljikovodikov dobimo curek ogljikovih (in vodikovih) ionov, in z izbiro ustreznih parametrov na podlagah raste plast DLC-prevleke. Hitrost nanašanja je reda velikosti 10 nm/min, kar je primerljivo s PVD-postopki. Visoka energija ionov zagotavlja dobro adhezijo, homogenost vzdolž izvira je dobra, homogenost prečno na izvir pa zagotovimo z vrtenjem ali oscilacijo vzorca.

Posebna prednost je zelo enostavno krmiljenje procesa. Pri PVD-postopkih sta jedkanje in nanašanje ločena postopka, pogosto vsak s svojim napajalnikom in izvirom. Preklop med jedkanjem in nanašanjem je sestavljen iz vrste korakov, ki lahko skupaj trajajo več minut (to še posebej velja za postopen dvig moči). Pri anodnem ionskem izviru pa je edina razlika med jedkanjem in nanašanjem v izbiri delovnega plina ⁽⁵⁾. Preklop iz jedkanja v nanašanje torej pomeni le odprtje ventila za npr. aceten ob hkratnem zaprtju ventila za argon, kar traja le nekaj sekund. Napajalnik ostane prižgan pri enaki moči, razen morebitnih popravkov (npr. iz 2 kV pri jedkanju na 1,5 kV pri nanašanju). Tudi v fazi nanašanja lahko spreminjamo karakteristike: večplastno prevleko naredimo s periodičnim spreminjanjem enega parametra (npr. 1 kV / 2 kV / 1 kV / 2 kV ...). Pri DLC-prevlekah lahko takšna sprememba pomeni periodično spreminjanje deleža vezi $sp^2:sp^3$ in s tem periodično spreminjanje trdote.

Nanašanje DLC-prevlek z anodnim ionskim izvirom se je pred nekaj leti uveljavilo v proizvodnji arhitekturnih stekel ⁽⁶⁾. Razvili so "in-line" sisteme za nanos trde, a tanke antiabrazijske prevleke, ki ščiti steklo pred mehanskimi poškodbami. Z drugih

področij omenimo možnost nanašanja DLC-prevlek na trde diske ⁽⁷⁾.

4 SKLEP

Anodni ionski izvir bi najlažje uvrstili v skupino postopkov PACVD (plazemsko podprto kemijsko nanašanje iz parne faze), čeprav je energija ionov bistveno višja kot pri klasičnih postopkih PACVD. Najbolj pa preseneča razkorak med po eni strani enostavnostjo postopka, enostavni in robustni konstrukciji naprave in po drugi strani skromni razširjenosti tehnike v današnjih vakuumskih tehnologijah. Raziskave v prihodnjih letih utegnejo ta razkorak odpraviti. Anodni ionski izvir je instaliran v Laser Center Leoben, vendar se ga je doslej uporabljalo le za jedkanje podlag. V letošnjem letu pa smo s to napravo naredili prve uspešne poskuse nanašanja prevlek diamantu podobnega ogljika, o čemer bomo poročali v eni od naslednjih števil Vakuumista.

5 LITERATURA

- ¹V. V. Zhurin, H. R. Kaufman, R. S. Robinson, *Plasma Sources Sci. Technol.* 8 (1999), R1–R20
- ²<http://www.msi-pse.com/Plasma%20Surface%20Engineering/Spindrift%20Sources.htm>
- ³A. Shabalin, M. Amann, M. Kishinevsky, C. Quinn, N. Capps, 43rd Annual Technical Conference Proceedings, Denver, April 15–20, 2000, Society of Vacuum Coaters, dostopno na strani http://www.advanced-energy.com/en/MAGAZINE_REPRINTS.html
- ⁴N. Capps, D. Carter, G. Roche, Ion source applications: Si-doped DLC, *prospekt*, 1999, dostopno na strani http://www.advanced-energy.com/en/WHITE_PAPERS.html
- ⁵N. Capps, B. Goldsworth, D. Carter, G. Roche, Ion source applications: DLC deposition, *prospekt*, 1999, dostopno na strani http://www.advanced-energy.com/en/WHITE_PAPERS.html
- ⁶V. S. Veerasamy, H. A. Luten, R. H. Petrmichl, S. V. Thomsen, *Thin Solid Films* 442 (2003), 1–10
- ⁷A. Shabalin, M. Amann, M. Kishinevsky, K. Nauman, C. Quinn, E. Anoikin, A. Bourez, Industrial ion sources and their application for DLC coating, *prospekt*, 2001, dostopno na strani http://www.advanced-energy.com/en/WHITE_PAPERS.html

VAKUUM TRUBARJEVIH DNI (ob 500-letnici Trubarjevega rojstva)

Stanislav Južnič

AMNIM, d. o. o., Gorazdova 3, Ljubljana

POVZETEK

Trubarjevo leto 2008 bo znova razdelilo slovenski narod na "naše" in sovražnike naših. Ker smo vakuumisti pri tovrstnih zdrahah načeloma nevtralni, si kaže pogledati, kaj so slovenski in pri nas gostujoči razumniki Trubarjevih dni menili o vakuumu, o raziskovanju materialov in o lastnostih površin. Raziskane so razlage vakuumu v knjižnicah na tedanjem Kranjskem in Štajerskem, pa tudi mnenja slovenskih učenjakov, ki so predavali na dunajski, tübingenski ali padovski univerzi.

Vacuum in Trubar's time (at 500th anniversary of Trubar's death)

ABSTRACT

Trubar's year 2008 will divide Slovenians again into "ours", and their enemies. Vacuum researchers are supposedly neutral at such kind of quarrels. It is a good opportunity to examine the opinions about vacuum and material science at Trubar's time. The opinions about vacuum at libraries of Trubar's time Carniola and Styria were researched in light of the scientists' lectures at Viennese, Tübingen, and Padua Universities.

1 UVOD

U času Trubarjevega rojstva so najpomembnejši slovenski profesorji humanisti predavali na Dunaju, kjer so zasedali toliko poglavitnih stolic in položajev kot nikoli prej ali pozneje. Primož Trubar se je na dunajsko univerzo vpisal 14. 4. 1528 in tam poslušal filozofijo s fiziko pri najimenitnejših slovenskih učenjakih, kot je bil Štajerc Andrej Perlah, medtem ko je Zasavec Matija Hvale bržkone umrl že pred Trubarjevim študijem. Kljub temu pa je Trubar seveda bral Hvaletovo filozofijo narave z razmišljanji o vakuumu, ki se nam je morda v NUK-u ohranila prav iz Trubarjeve knjižnice. Žal so nekaj mesecev po Trubarjevem prihodu Turki pod Sulejmanom Veličastnim prvič oblegali Dunaj; zato Trubar študija ni končal, temveč se je vrnil v Trst. Podobno je postopala večina Trubarjevih sošolcev, tako da je število na Dunajsko univerzo vpisanih študentov od blizu 700 iz Trubarjevih deških let padlo domala na ničlo leta 1532.¹

Na Dunaju je vsaj deloma študiralo kar nekaj Trubarjevih sodelavcev, med njimi Adam Bohorič, ki je tam dosegel prvo akademsko stopnjo bakalavra leta 1547.² Na Dunaju nabrana razmišljanja o vakuumu in drugih zagatah tedanjega prirodnoslovja so vplivala na Bohoričev nakup petstotih knjig, njegov rektorat v

Ljubljani in navsezadnje na njegovo pisanje. Vsaj Bohorič in Trubar sta bila tako med slovenskimi protestanti dediča bogate tradicije razmišljanj o vakuumu dunajskih profesorjev slovenskega rodu.

Starejši Trubarjevi sodelavci so študirali v severni Italiji, med njimi škofa Peter Bonomo v Bologni (1487),³ Peter Pavel Vergerius mlajši pa v Padovi do leta 1523.⁴ Večina Trubarjevih mlajših sodelavcev, skupaj z njegovima sinovoma, Jurijem Dalmatinom, Frischlinom in Bohoričem je študirala v Tübingenu, saj se je württembergški vojvoda posebej zavzel za širjenje protestantizma v notranjeavstrijskih deželah s Kranjsko vred.

2 TERPINOV SEZNAM GORNJEGRAJSKIH KNJIG

Kakšno je bilo Trubarjevo mnenje o vakuumu? Trubarjev knjižni načrt je bil izrazito verski,⁵ več prirodnoslovnih misli pa je v njegovih pismih in predvsem v knjigah njegove knjižnice. Trubar je večkrat pohvalno pisal o Luthrovemu poglavitnemu sodelavcu, Filipu Melanchthonu, katerega fiziko z opisi vakuumu so uporabljali tudi v Ljubljani.⁶ Melanchthon je bil prepričan, da se narava kot prvo izogiba neskončnim veličinam, kot drugo vakuumu, po tretji plati več sočasnim legam istega telesa, končno pa še prodiranju v snov, kot peto pa uničenju substance. Zanimal je možnost vakuumu v naravi in podal primer vodne ure, kjer voda sproti zapolnjuje izpraznjeno. V vakuumu gibanje ni možno, so bili Melanchthonovi standardni sholastični odgovori, pa tudi nadaljevanje v poglavje o redčenju in kondenzaciji je bilo povsem Aristotelovo, podobno kot opisa časa in neskončnosti.⁷

Seznami knjig Trubarja in njegovih sodelavcev se niso ohranili, vendar pa so jih večinoma spravili v Gornjegrajsko škofijsko knjižnico na našem delu Štajerske. Tja so prenesli številna dela iz knjižnice protestantskih stanov, kjer je bila med drugim zbrana zapuščina protestantskih šolnikov: Ljubljančana Lenarta, njegovega sina Samuela Budina in 274 knjig Primoža, pozneje Felicijana Trubarja. Primož je po prodaji svoje ljubljanske hiše leta 1569 skrinjo s knjigami podaril kranjski "deželi in cerkvi"⁸ kot

¹ Csendes, Oppl, 2001, 386.

² Ahačič, 2007, 77.

³ Kidrič, 1925, 1: 53.

⁴ Filipović, Rajhman, 1982, 4: 407.

⁵ Kranjc-Vrečko, 2002, 548.

⁶ Rajhman, 1986, 28, 41; Trubarjevo pismo cesarju Maksimilijanu 2. 1. 1560.

⁷ Melanchthon, 1560, 157^v, 158^r, 158^v, 160^r.



Slika 1: Vodnica Slovnica vodi študenta proti hiši znanja v eni od del iz Terpinovega najstarejšega slovenskega ohranjenega kataloga knjig (Reisch, 1508)

osnovo za stanovsko knjižnico ali celo prvo javno knjižnico na slovenskih tleh,⁹ v kateri je bilo mogoče prebrati tudi številna mnenja o vakuumu. Leta 1604 so deželni stanovi skušali pretihotapiti v sodih skrite knjige na Švabsko, vendar so jim tovor zaplenili in ga večidel odpeljali v Gornji Grad.

Pol stoletja pozneje je škofijski vikar Terpin v Gornjem Gradu urejeval nekdanje knjige ravnatelja stanovske šole v Ljubljani Lenarta Budina, med njimi prirodoslovje Gregorijusa Reisch, vezano v lesene platnice.¹⁰ Reisch si je služil kruh kot spovednik cesarja Maksimilijana I. in prior pri sv. Janezu Krstniku v Freiburgu v Breisgauu. Obravnaval je aritmetiko, glasbo, arhitekturo, perspektivo in astronomijo ob odličnih risbah pod Dürerjevim vplivom. O vakuumu je pisal predvsem ob opisu veselja. Prvi je dal tiskati skico človeškega očesa, pod naslovom *Typus grammatio* pa je narisal gospo Slovnico, ki vodi učenca po poti znanja skozi petnadstropno hišo. Na tretjem nadstropju je čakala logika, na četrtem pa fizika s teorijami vakuumu in moralnimi nauki.¹¹

⁹ Rajhman, 1982, 4: 210.

¹⁰ Terpin, 1655, 16; Simoniti, 1974, 31.

¹¹ Ahačič, 2007, 70.

¹² Simoniti, 1974, 17–18.

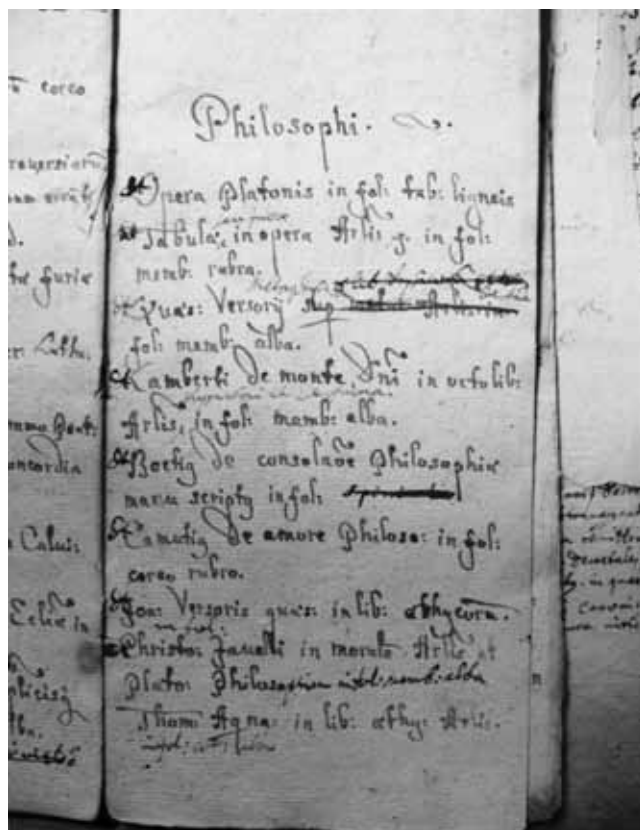
¹³ HHStA, FAA, 337–392.

Preglednica 1: Terpinov (1655) seznam gornjegrajskih knjig po enotah¹² z opisi vakuumu v primerjavi s trinajst let poznejšim Schönlebnovim¹³ popisom knjig deželnega glavarja grofa Volfa Engelberta Turjaškega. Schönleben je v svoj katalog vnesel dobrih trikrat več enot od Terpina.

Terpinov vsebinski razdelek, stran	Terpinovih naslovov	Število naslovov v Schönlebnovem popisu
Filozofija s fiziko, 15 ^r -16 ^r	55	85
Medicina, 16 ^v -17 ^r	19	92
Splošna zgodovina, 20 ^r -21 ^v	99	661
Skupaj vseh naslovov	994	3257

3 HVALE

Najpomembnejši slovenski mislec o vakuumu Trubarjevih dni je bil Matija Hvale iz okolice Litije. Med gornjegrajskimi knjigami ljubljanskih škofov na južnem Štajerskem, ki jih je urejeval Terpin, je bila tudi Hvaletova Filozofija narave (1513). To je bila



Slika 2: Terpinov popis filozofskih knjig z opisi vakuumu – začetek (Terpin, 1655, 15^r)

Preglednica 2: Terpinov popis knjig z opisi vakuuma

Pisec	Naslov	Stran	Kraj in leto
Platon	Opera Platonis	15 ^r	
Palamedes	Tabula seu index In opera Arlis	15 ^r	
Johannes Versor	Questionis in lib: phys.	15 ^r	1486. Köln (2 izvoda)
Boethius, Anicije Manilaj Severin	De consolata philosophiae, rokopis	15 ^r	
Wildenberg, Heronymus	Totus philosophiae humanae	15 ^v	1571. Basel: Oporniana
Friderici Sunczer	octo libros physicorum Aristotelis	15 ^v	1500. Benetke: Jacobus Pentius
Scarlichi, Rajnald	manu scripta philosophia	15 ^v	1606-1608. Gradec
Reisch, Gregorius	Margarita philosophica	16 ^r	1508. Strasburg: Joannes Grüniger
Aristotel	Physica libri	16 ^r	
Aristotel	Tractatus de cometis material	16 ^r	1653. Giessa: Chemlin
Jezuiti iz Coimbre	Octo lib. Phys.	16 ^r	
Jezuiti iz Coimbre	In 4 libros de Coelo.	16 ^r	
Toledo, Francisco (Toledí)	In Octo Libros (Aristotelis) Physica	16 ^r	1600/1617. Benetke: luntas/Bertan
Ziegler, Jakob	Astronomia Plinis	16 ^r , 21 ^v	1531. Basel: Henric Petri (2 izvoda)
Massario, Francesco; Plinij	In nonum Plinii de naturali	16 ^r	1537/1538. Basel: Froben (T).
Plinij, Gaius Cecilius starejši	Historia naturalis. (2 izvoda)	16 ^v , 17 ^r	
Jordan, Gregor	Theatr. Coeli et Terra	21 ^v	1591. Köln (2 izvoda)
Bordini, Fran	Quas et resp. Matematica	21 ^v	1573. Bologna: Alexander Benati
Padovani, Giovanni	Viridarium Mathematicorum	21 ^v	1563. Benetke: Bologni Zalter

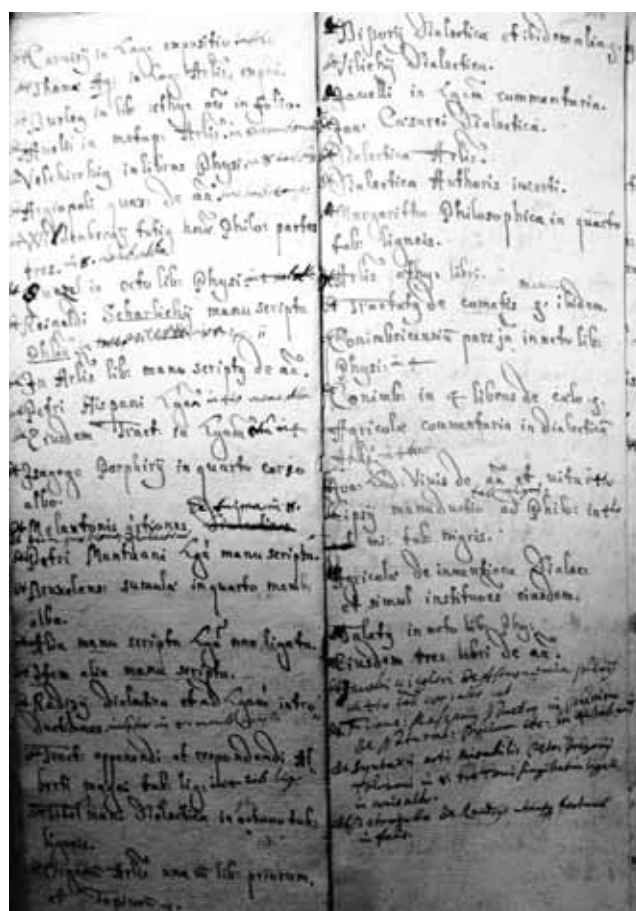
najstarejša tiskana obravnava vakuuma, kar so jih objavili prirodoslovci in filozofi slovenskega rodu.

Hvale je začel sestavljati svojo edino objavo vsaj že leta 1502, ko je bil magister, blagajnik, predstojnik filozofske fakultete in vodja enega poglavitnih študentskih domov na Dunaju. Hvale je bil od 12. 4. 1510 dalje pol leta dekan Filozofske fakultete.¹³ Prenavljal je nominalizem, ki je na dunajski univerzi gospodoval že od njene ustanovitve leta 1365. Obenem je zagovarjal humanizem, ki naj bi na Dunaj znova privabil študente, potem ko so že začeli uhajati v Krakov in druga učilišča, saj je celo Kopernik študiral v Krakovu. Boj za humanizem je na Dunaju med letoma 1492 in 1502 vodil Slovenec astronom Perger kot pisec prve slovenske slovnice,¹⁴ nadaljeval pa Hvale kot najbolj izrazit naravoslovno usmerjen filozof prodirajočega humanizma z zametki novih idej o vakuumu.

Uvod nepaginirane knjige je Hvale 10. 1. 1512 naslovil na svojega sodelavca, Radovljčana Pavla Obersteinerja, dunajskega magistra filozofije, ki je istega leta dosegel plemiški stan. Cesar Maksimilijan I. je leta 1513 naročil slovar slovenskega jezika svojemu svetovalcu in tajniku Obersteinerju, ki je obvladal tedaj zelo cenjeno umetnost tajnopisa. Obersteiner je postal stolni prošt, med letoma 1516 in 1544 pa kancler Dunajske univerze in nasprotnik luterancev v Nürnbergu.

Švicarski zdravnik in župan mesta Gallena, poznejši protestant Joachim Vadian, je Hvali sestavil

uvodni epigram,¹⁵ ki priča o Hvaletovi vpetosti v



Slika 3: Terpinov popis filozofskih knjig z opisi vakuuma – konec (Terpin, 1655, 15^v, 16^r)

¹³ Sodnik-Zupanec, 1975, 242, 244–245, 256, 259; Uršič, 1975, 89.

¹⁴ Ahačič, 2007, 90.

¹⁵ Uršič, 1975, 89-90; SBL, 4: 80 Sodnik-Zupanec, 1975, 164, 253, 262, 269, 294.

dunajske humanistične kroge. Hvaletov učenec in nato sodelavec Vadian je med letoma 1516 in 1518 predaval humanistične vede. Skupaj s Tannstetterjem in drugimi izobraženci je bil član dunajske *Sodalitas litteraria Danubiana* in je tako deloval pod enakimi humanističnimi vzorci kot pisec geometrije v Terpinovi lasti Vögelin.

Hvale je knjižico zasnoval kot komentarje k *Parvulus philosophiae naturalis*, ki so jih na Dunaju uporabljali za dosego akademske stopnje bakalavra filozofije s prirodoslovjem in so jim že posvečali več časa kot študiju drugih slovitih del. Delo je razdelil v tri traktate, vsakega z več kot dvajsetimi lekcijami. Nasprotoval je Averroesu, podobno kot francoski humanist Fabri Stapulet, ki ga je Hvale zelo cenil.¹⁶ Hvale je po drugi strani uporabil precej arabske literature. Soglašal je z Occamovo (Ockham) teorijo impetusa, kot jo je razširil nominalist Buridan, usmerjal pa se je predvsem v prirodoslovne vede fiziologije, biologije in medicine. Buridan je bil leta 1327 rektor univerze v Parizu, leta 1342 pa kanonik v Arrasu. Zanimal je Aristotelovo trditev, da telesom po začetnem sunku (*impetus*) nadaljnje gibanje omogoča okoliški medij. Po Buridanu zadostuje sunek, ki ga je opisal kot nekaj podobnega sodobni energiji. Medij mu ni bil nujen, še posebej ne za gibanje po vesolju, ki ga je tako napolnil kar z vakuumom, ne da bi to obešal na velik zvon. Tako je utemeljil princip vztrajnosti iz prvega Newtonovega zakona, nakazal pa je celo poznejši pojem sile. Vendar je še dolgo za njim Galileo uporabljal besedo "*impeto*" ali gibljivost tako za hitrost, ki jo telo pridobi v določenem času, kot za razdaljo, prepotovano na različno naklonjenih ravninah v danem intervalu. Kljub navdušenju nad Buridanom pa Hvale ni povsem sprejel njegovega odobravanja vakuumu, ki je bilo v tistem času tako redko. Dunajska univerza je že od svoje ustanovitve (1365) podpirala nominalizem Buridana in frančiškana Ockhama, med fiziki znanega po "Ockhamovi britvi". Nasprotna smer realistov Alberta Velikega in njegovega učenca Tomaža Akvinskega, ki je bila močno zastopana v Terpinovem katalogu knjig, je vakuum načeloma dopuščala kot možnost, saj ga ni enačila z ničem.

Dvanajsto lekcijo prvega dela je Hvale okrasil s sliko poprsja človeka, še posebej pa se je posvetil posameznim delom lobanje in požiralnika, ki ga je narisal vidnega zunaj telesa. Tam je narisal še simbolično sliko človeške glave s črkami kot oznakami posameznih delov očesa.¹⁷ Problem prostora, vakuumu in kraja je rešil po okrajšani razlagi Aristotelovih

definicij Alberta Velikega, katerega knjige je Terpin prav tako popisal. Kljub sicer modernim humanističnim prijemom je tu Hvale pristal na sholastičen Aristotelov prostor kot določilo snovne substance. To je pomenilo, da ni prostora brez snovi. Zato je Hvale trikrat odklonil obstoj vakuumu: ni praznega prostora zunaj sveta, ni ga v naravi zavoljo *horror vacui*, prav tako pa vakuumu ni v snovni vsebini teles, denimo v domnevnih porah.¹⁸ Posebno vprašljiva je bila prva trditev, ki je zanikala vakuum v vesolju, in je marsikdo dvomil o njej zaradi očitno neoviranega gibanja nebesnih teles.

V prvi lekciji drugega dela je Hvale opisal štiri antične elemente in skiciral njihove povezave s štirimi človeškimi temperamenti, štirimi občutki in podobno.¹⁹ Število štiri se je humanistu Hvaletu pač zdelo nekaj posebnega. V šesti lekciji drugega dela je opisal redčenje in kondenzacijo. Redčenje je bilo seveda pot k vakuumu, ki pa Hvaletu ni bil povsem po godu.

Ob Hvaletu so na Dunaju predavali številni drugi slovenski učenjaki Trubarjevih dni. Štajerec Perger je leta 1464 na dunajski univerzi kot magister filozofskih znanosti predaval Evklidovo geometrijo, optiko in matematiko z astronomijo, v kateri je posegal v vprašanja vakuumu. V letnem semestru 1470/71 je bil



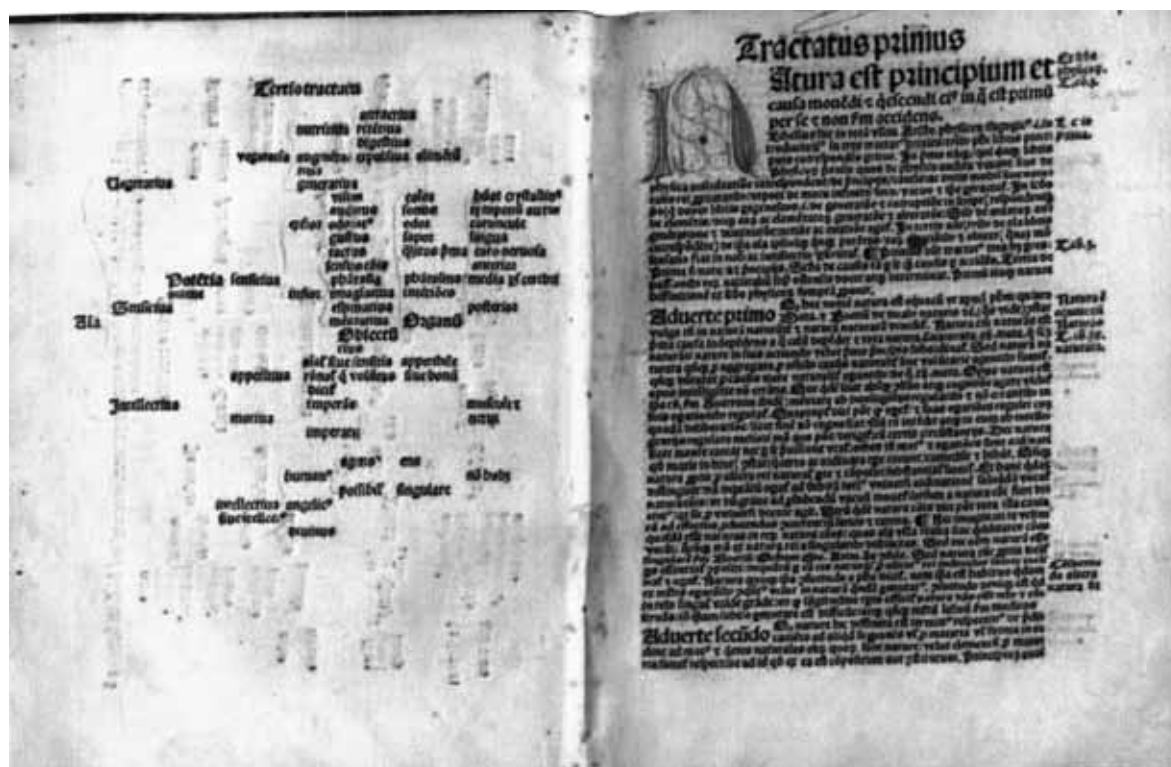
Slika 4: Glava v Hvaletovi knjigi

¹⁶ Sodnik-Zupanec, 1975, 272, 277, 260, 302.

¹⁷ Sodnik-Zupanec, 1975, 281, 283, 288, 291, 302; Pintar, 1949, 53; Hvale, 1513, 1: lekcije 12–17.

¹⁸ Sodnik-Zupanec, 1975, 288–289; Hvale, 1513, 1: lekciji 17–18.

¹⁹ Sodnik-Zupanec, 1975, 302; Pintar, 1949, 53; Hvale, 1513, 2: lekcija 1.



Slika 5: Stran iz Hvaletove knjige

dekan dunajske filozofske fakultete, v zimskem pa rektor celotne univerze.

Leta 1492 je cesar Friderik III. imenoval Pergerja za svojega pooblaščenca na dunajski univerzi; zato je imel ob Friderikovi smrti leta 1493 veličastni žalni govor kot kancler novega cesarja Maksimilijana I., ki se je kmalu izkazal s svojo podporo znanstvenikom Pergerjevega kova. Bernhard je službo superintendanta obdržal do 13. 10. 1500, ko je bil gotovo že bolan. Štajerec Perlah z zahodnega roba Slovenskih goric morda ni osebno poznal svojega malo vzhodnejšega rojaka Pergerja, vendar sta s svojim vplivom skoraj sledila drug drugemu na dunajski univerzi in na dvoru cesarja Maksimilijana I. Perlah se je tri leta po Trubarjevem rojstvu, leta 1511, vpisal na dunajsko filozofsko fakulteto in po štirih letih dosegel naslov magistra pod vplivom rojaka Matije Hvaleta. Že kot študent je Perlah začel po tedanjih navadah prepisovati in prirejati tuja dela, ki jih je večinoma posvečal svojemu zaščitniku, dunajskemu škofu Juriju Sladkonji; le-ta je bil rojen Ljubljčan, kar ga je še posebej približalo vrlemu Štajercu Pergerju. Sladkonja je v letu pred svojo smrtjo spomladi 1522 dovolil v dunajski cerkvi sv. Štefana pridigati zagovornikom novih reformacijskih pojmovanj,²⁰ kar so kmalu preklicali.

Perlah je po doktoratu na medicinski fakulteti leta 1530 postal še profesor medicine. Sestavil je analogno računalno *Astrolabium Arithmeticum*. Njegov izum

Organum Ptholemei je dajal dovolj dobro sliko za opazovanje Merkurja, kar so tedaj, pred izumom teleskopa, zmogli le redki. Latinski prevod Perlahovih nemških efemerid za leto 1531, izdanih leta 1530 na Dunaju, je oskrbel Perlahov učenec Belokranjec Kukec. Ta je bil leta 1535 profesor matematike in prokurator študentov ogrske narodnosti na dunajski univerzi, leta 1539 pa je postal dekan dunajske filozofske fakultete. Tako sta Slovenca Perlah in Kukec dekanovala istočasno kar na dveh od štirih fakultet dunajske univerze. S Pergerjevo in Perlahovo tradicijo koledarjev je nadaljeval zdravnik Jakob Strauss, ki je pot k izobrazbi začel v Budinovi zasebni šoli v Ljubljani. Od leta 1552 do leta 1556 je Strauss študiral na dunajski filozofski fakulteti do stopnje magistra. Leta 1560 je končal študij z odgovori na 144 vprašanj, ki so se dotikala tudi obstoja vakuuma. Nato se je še pred Istranom Santorijem odpravil na univerzo v Padovo in dobil doktorat iz medicine leta 1565. Leta 1571 je postal zdravnik v Celju, občasno pa je zdravil še na Ptuj in v Radgoni. Tradicijo objavljjanja koledarjev in prerokb sta po Perlahu v naših krajih nadaljevala Trubar in Kepler kot deželni fizik in profesor v Gradcu. Denar pri tovrstnih tiskih ni ležal le v podpori nekoliko praznovernih vladarjev in plemenitašev; od Pergerja dalje so namreč objavljali cenene koledarje celo za preprosto ljudstvo, kar je šlo seveda za med.

²⁰ Belii, 1971, 43, 46, 48.

4 SANTORI

Ob Dunaju je bila Padova prav tako pomembno središče učenjakov slovenskega rodu. Številni tedanji izobraženci so bili zdravniki, med njimi piranski protestant Janez Krstnik Goineo in Koprčan Ivan Bratti. Bratti je bil rojen v Kopru, kot nam sporoča zaznamek na njegovem glavnem delu Razpravi o novi in stari medicini. Brattijev sodobnik iz Kopra je bil fizik in zdravnik Santorio, sin furlanskega plemiča in koprške kneginje. Po začetnih šolah v Kopru in Benetkah je leta 1582 končal študij v Padovi, nato pa je zdravil na dvoru poljskega kralja, kjer je kapucin Valeriano Magni pol stoletja pozneje (1646) samostojno opravil Torricellijevemu podoben poskus v Varšavi. Razpoloženje na poljskem dvoru je bilo tako zelo naklonjeno vakuumskim poskusom že v času, ko je Santorio prvi stehal zrak in tako dokazal zračni tlak. S tem je posredno potrdil možnost vakuuma, kar je pozneje ponovil Otto Guericke ob pomoči ljubljanskega kneza Janeza Vajkarda Turjaškega. Med letoma 1587 in 1599 je bi Santorio zdravnik v Karlovcu, ki so ga dogradili med letoma 1578 in 1583, oziroma na dvorih hrvaških grofov Krste, Juraja ali Nikole Zrinskega.

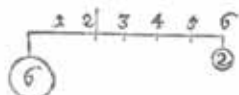
Nato je zdravil v Benetkah kot član Galileijeve družčine.

Med letoma 1611 in 1624 je Santorio v Padovi predaval medicino po dveh šestletnih pogodbah na mesto tri leta starejšega Galileija, ki je odšel na medicinski dvor v Firence. Po upokojitvi (1624) je Santorio živel v Benetkah. V komentarju arabskega zdravnika Avicenne je takoj po začetku svojih padovskih predavanj prvi dodal skalo Galileijevemu termometru za medicinske meritve.²¹ Leta 1634 je izšel tretji ponatis Santorijeve medicinske knjige *De Statica Medicina*,²² ki jo je leta 1678 ponujal Mayr v Ljubljani.²³ Z medicinsko statiko v obliki aforizmov je Santorio vpeljal raziskovanje metabolizma in druge poskuse v biološke vede. Santori je izumil tehtnico na stolu za merjenje lastne teže med jedjo in pitjem. Tako je dokazal velik delež izločanja skozi kožo. Meril je tlak in sestavljal merilnik pulza z Galileijevim nihalom. Njegova razlaga metabolizma se pogosto omenja ob izumu krvnega obtoka sedemnajst let mlajšega Angleža Harveyja, ki je prav tako študiral v Padovi. Santorijeva zbrana dela (*Opera omnia*) so bila natisnjena posmrtno leta 1660.²⁴

364 **Neunter Theil der Equidistunden.**
Wann nun nachgehends die Sonne den Lufft wider erwärmet / so löset er das Eis gleichsam auf / und machet es wider zu Wasser: daher die Rathschel von dem Eis zu verschicken welche saget:
Wir hat die harte Lufft den Harnisch angezogen / daß ich wie kühles Holz nicht mehr so schwer gewogen.
Die Mutter * welche mich erzeugte mit hellem Schein / muß nach verwichener Zeit auch meine Tochter seyn.
* Das Wasser/wann das Eis aufgethauet/wird wieder zu Wasser.

Die XV Aufgabe.
Was der Waagbalken mit dem Gewicht für ein Ebenmaß habe.

Wann man ein Gewicht an eine gerade Linie hängt / so ruhet solches nicht / es werde dann die abhängende Linie 2 gleiche und gerade Winkel Waagrecht machen. Hängt man nun gleiche Gewicht an den Balken / so werden sie eine solche Ebenmaß oder Proportion gegen einander halten / als die Abtheilung des Waagbalkens hat. Hieraus erhellet nun / daß man ungleiche Gewichte andrängt / daß solche nach der Auftheilung des Waagbalkens das Günglein insiehn machen können: Zum Exempel / Ich habe 6 und 2 pfunde / so sage ich 6 und 2 ist 8. theil den Waagbalken in 8 Theil / und hänge die 6 pfund an den einen / die 2 pfund an den andern theil: Nun hebe ich diese Gewichte gleich insiehend auf / wann ich den Waagbalken bey der zweiten Abtheilung empor trage.



Also muß man die Gewichte zusammen setzen / und nach denselben den Waagbalken abtheilen / und dieses ist der Grund der Waagfunf / welcher in den künstlichen Bewegungen großen Nutzen hat.

Die

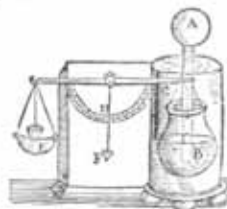
Neunter Theil der Equidistunden.
Die XVI Aufgabe.
Den Lufft abzuwägen.

I. Nangedie Waag in ein Wasser / also daß die hölzerne Waagschalen auf dem Wasser schweben.

II. Nimm ein aufgeblasene Schweinsblase / in welcher ein pfund oder halb pfund Lufft / und ist solches / wann man die Blasen gewogen und darvon abgerechnet hat / leichtlich zu wissen.

III. Binde diese Blase unter die Waagschalen / und beschwere dieselbe also / daß sie unter das Wasser sinken muß / so wirst du wissen können / wie leicht der Lufft.

Auf eine andere weise nimmet man die 2 gegen einander gerichtete Gläser A. setzet sie / wann B mit Wasser angefüllt / in ein hölzernes Gefäß / daß bey C ein Spalt hat / dardurch der Waagbalken sich mit dem Gegengewicht E zieht / und die Grad oder Stufen der Hitze und Wärme weist. So nun gar warmer Lufft ist / wird solcher dz Gegengewicht über sich heben / kan man also viel Gewichte einlegen / daß DF wider Waagrecht zustehen kommet / und werden solche Wettergläser (Thermoscopia) genennet.



Es kan auch ein Bild auf das Gefäß gerichtet werden / welches aus einem Berge heraus geht / wann warmes Wetter ein fällt / und hinein gehet / wann es kalt wird. Besiehe die 9 Aufgabe des nachfolgenden XII Theils.

365

Die

Slika 6: Skica tehtanja zraka v Volfovi knjižnici, ki ga je prvi opravil Koprčan Santorio Santorio (Harsdörffer, 1651, 2: 365)

²¹ Santorio, 1614; Crombie, 1970, 405, 433.

²² Dadić, 1994, 12, 237.

²³ Mayr, 1678, 60.

²⁴ Dadić, 1994, 12, 237.



Slika 7: Takole je Koprčan Santorio sam sebe tehtal po obilnem obroku, da bi potrdil domnevo o prehajanju snovi skozi kožo

5 FRISCHLINOV VAKUUM V SIFONIH POD CERKNIŠKIM JEZEROM

Ob koncu Santorijevih padovskih študijev je Frischlin postal prvi ljubljanski znanstvenik evropskega slovesa. Resda pri nas s Trubarjevim priporočilom ni preživel veliko več kot dve leti, vsekakor pa je Ljubljano uvrstil na zemljevid učenjakov sveta.

Frischlin je 12. 11. 1562 matrikuliral na Univerzi Tübingen, eno leto po preselitvi Primoža Trubarja v bližnji Urach,²⁵ kjer je Frischlin pozneje žalostno končal. Leta 1571 so univerzo Tübingen zaprli zaradi kuge, o kateri je Ljubljančanom poročal tudi Trubar.²⁶ Frischlin je sedem let vodil filozofske razprave bodočih bakalavrov, ki so trajale po tri ure. Za bakalavre je sestavil celo enciklopedijo fizike, moralke, astronomije, logike in retorike, kot je poročal senatu univerze. Jeseni 1574 je tako javno izprašal kar osemtrideset kandidatov; med njimi so se trije potegovali za bakalavreat. Vprašanja je po vrsti postavljaj iz sedmih prostih umetnosti.²⁷ Začel je z aritmetiko,

sledila je glasba, geometrija, Sonce z Luno, astronomija, problemi vida in svetlobe ter duh z dišavami kot poslednje med človeškimi čutili.²⁸ Vprašanja o vakuumu so spadala predvsem v drugo polovico zagovora. Tübingen je kot ena vodilnih protestantskih univerz oblikovala mnenje o vakuumu Frischlina, Keplerja, pa tudi Trubarja in domala vseh vidnih protestantov v tedanji Ljubljani.

Supernova, prvič opažena 5. 11. 1572, je povzročila veliko razburjenje v Evropi. Močno svetleča zvezda, ki se je nenadoma uveljavila v domnevnem vakuumu vesolja, je sprožila številna ugibanja. Seveda tudi Frischlin ni pozabil pristaviti svoj lonček in je takoj pomladi naslednje leto (1573) objavil 831 verzov o supernovi; pesnitev je sestavil že novembra 1572. Naslovil jo je na Wilhelmovega brata, princa Friedericha Württenberškega, objavil pa jo je skupaj s spremnim pismom in Maestlinovimi opazovanji. Poznejši Keplerjev učitelj Maestlin je prav tedaj postal drugi profesor matematike v Tübingenu in je s svojo opazovalno astronomijo dopolnil Frischlinov bolj filozofski pristop. Očitno sta bila tisti čas še v dovolj dobrih odnosih.

Kranjci so prav tako sodelovali v württenberških razpravah o supernovi, saj je blizu Tübingena v Urachu nekaj časa pridigal Primož Trubar, njegov



Nicodemus Frischlin

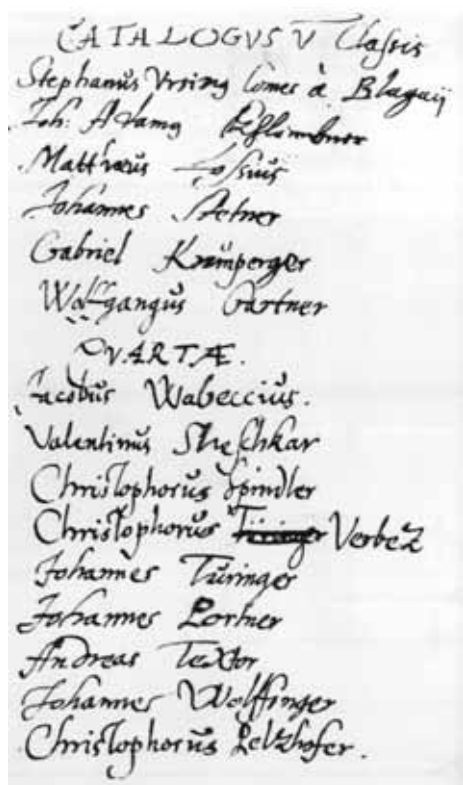
Slika 8: Frischlinov potret

²⁵ SBL, 4: 208.

²⁶ Rupel, 1966, 302.

²⁷ Frischlin, 1598, 169–252.

²⁸ Frischlin, 1598, 207, 210, 211, 213, 219, 224.



Slika 9: Frischlinovi študentje petega in četrtega letnika v Ljubljani leta 1583, kjer so slišali tudi marsikaj o vakuumu (ARS, Deželni Stanovi I, fasc. 98).

mecen baron Ivan Ungnad pa je tam do smrti vodil tiskarno. Junija 1582 je vojvoda dovolil Frischlinu sprejeti položaj ljubljanskega rektorja.²⁹ Pri iskanju naslednika upokojenega ljubljanskega šolskega rektorja Adama Bohoriča sta si dne 3. 4. 1582 zelo prizadevala dr. Jakob Andreae v Tübingenu in Primož Trubar v Derendingenu. Nekaj tednov pozneje je Frischlin 1. 3. 1583 pisal Trubarju v Derendingen.

Frischlin se je 24. 6. 1582 po plovbi na Donavi čez Dunaj in Gradec odpravil v Ljubljano. Junija je prispel še brez družine in prevzel dne 1. 8. 1582 položaj rektorja stanovske šole. Frischlin je v svojem ljubljanskem obdobju v Benetkah objavil dva latinska učbenika, ki pa ju ni smel uporabljati pri pouku. Ker je knjigi izdal brez dovoljenja kranjskih deželnih stanov, so ga ti poklicali na zagovor. To je Frischlina ob prepirljivi ženi tako razjezilo, da je dal ostavko.

Frischlin je v Ljubljani vsekakor našel kar nekaj izobraženih mož. Ljubljansko znanost je podpiral ljubljanski tiskar Mandelc skupaj z astronomom-zdravnikom Straussom. Dne 1. 3. 1583 je Frischlin pisal proti vojvodi wirtenberškemu in celo proti Primožu Trubarju. Frischlin je bil vseskozi v sporu s kranjskim šolskim inšpektorjem, predstojnikom kranjskih šol Jurijem Dalmatinom, čeprav je podpiral natis

Dalmatinovega prevoda Biblije ob prihodu v Ljubljano. Leta 1586 je Primoža Trubarja v Derendingenu pokopal Frischlinov nasprotnik kancler in mestni prošt J. Andreae. Nagrobni zapis v verzih, ki ga še danes beremo na derendingenski cerkvi, mu je v grščini in latinščini sestavil Martin Crusius, ki je bil Frischlinu najhujši sovražnik.

Frischlin je bil dovolj izobražen, da si je znal zamisliti podzemne cevi v preluknjani zemlji, skozi katere je pronicala voda v Cerknisko jezero, da bi pozneje znova odtekla iz izsušenega dna. Tako je med prvimi raziskoval Cerknisko jezero in v svoj opis vpletel vakuum. Objavil je latinsko pisano odo o Cerkniskem jezeru, ki jo je ponatisnil Valvasor. Anton Urbas jo je tri stoletja pozneje deloma prevedel v nemščino. Valvasor je Frischlinu posvetil celo poglavje, dolgo osem strani,³⁰ seveda s posebnim poudarkom na ljubljanskem obdobju. Frischlin si je Cerknisko jezero osebno ogledal vsaj pozimi in bil za pričo uspešnemu ribolovu ali pa celo racam, ki naj bi jih bruhalo zimski hudourniki. Še bolj pomembna pa je bila Frischlinova zamisel o podzemnih sifonih (*siphonibus*), ki je prav tako postala del Valvasorjevega opisa.³¹ Seveda je bil Frischlin najboljši latinski pesnik svoje dobe. Izraz *siphonibus* je lahko uporabil tudi v pomenu brizgalne ali cevi, in ne le v sodobnem pomenu sifona ali natege, ki predpostavlja vmesni vakuum. Valvasorjeva latinščina pa je bila mnogo šibkejša in ni segala čez srednješolsko raven, tako da mu odenki Frischlinove pesnitve vendarle niso mogli biti povsem domači. Frischlinove sifone je podedoval Edward Brown leta 1669, ki je prav tako pisal o skritih zbiralnih jezercih v Javornikih, o sifonih med vidnim jezerom in domnevnim podzemnim jezerom. Podobno sta si Valvasor in Steinberg zamislila neskončno zaporedje sifonov pod Javornikom. Sifonsko teorijo je uspešno kritiziral šele Gruber, ki ni sprejel Steinbergovega opisa Cerkniskega jezera kot sistema med seboj povezanih sifonov. Gruber se je med prvimi pri opisu Cerkniskega jezera in Planinskega polja zavedal, da gre v koritu reke in jezer za ravnesje med dotokom padavin iz ozračja in odtokom reke proti morju.

Frischlin je spisal svojo astronomijo v obliki vprašanj in odgovorov, podobno kot Kepler pozneje svojo *Epitome astronomia Copernicana*, kar je bil zanimiv pedagoški prijem. Protestant Frischlin je v Ljubljani nenavadno pogumno podprl papeško koledarsko reformo, pri čemer pa je seveda imel podporo vladarja v Gradcu. Habsburška monarhija je privzela gregorijanski koledar leta 1584. Pozneje je gregorijanski koledar podprl tudi protestant Kepler,

²⁹ Röckelein, Bumiller, 1990, 136.

³⁰ Valvasor, 1971 *Die Ehre*, 2 (7): 450, 445–452.

³¹ Valvasor, 1977, 108.

kar je bil eden od povodov, da se tudi njemu ni posrečilo dobiti službe v Tübingenu.

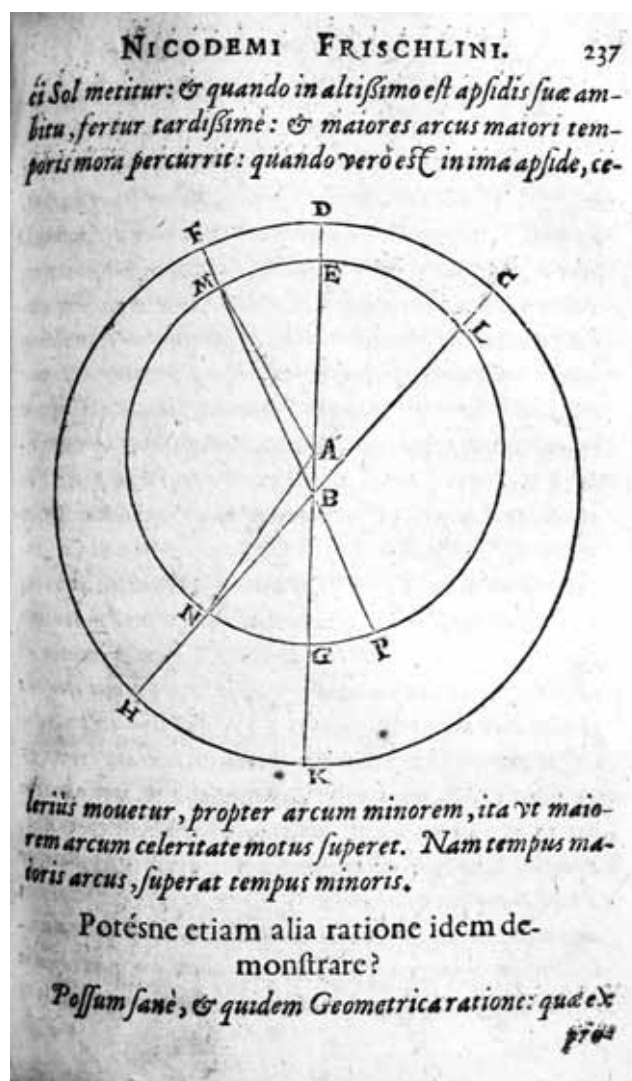
Frischlin je opisal podobnost med ljudmi in planeti in ločeval opazovalno astronomijo od astrologije. Zanimala ga je barva ognja supernove, ki jo je kljub Maestlinovi razlagi še vedno istovetil s kometi.³² Kopernika je vsekakor spoštljivo omenil glede gibanja neba. Glede toplote Sonca je navajal alkimistično delo Dvanajst ključev, ki ga je objavil domnevni nemški benediktinski menih Basilius Valentinus. Basiliusovo knjigo je uporabljal celo Newton. Po Basiliusu je Frischlin povzel pravilno trditev, da toplota Sonca spodbuja rast na Zemlji, vendar je ne povzroča.

Frischlin je o gibanju zvezd bral zapise Menelausa Aleksandrijskega in muslimanskega raziskovalca iz 9. stoletja Albategnusa (Albategnius) z arabskim imenom Abu Abdullah Muhammad Ibn Jabir Ibn Sinan al-Battānī al-Harrānī. Plinijevo in Ptolemajevo mnenje o kroženju Venere in Merkurja pod Soncem je sprejel v nasprotju s Platonom ali Aristotelom. Pri gibanju planetov skozi vakuum je upošteval predvsem Purbachovo dunajsko knjigo o gibanju osmih sfer³³ in se je tako približal tudi Hvaletovemu dunajskemu pojmovanju vesolja in vakuuma. Frischlin je ostal pri Aristotelovi filozofiji narave in ni priznaval vakuuma, podobno kot se mu je pred njim izogibal Hvale.

Dobrih četrto stoletja po poslušanju Frischlinovih tübingenskih astronomskih predavanj je Keplerjev učitelj Maestlin, sedaj sam že slaven astronom, v poročilu za tübingensko univerzo zavrnil Frischlinovo astronomijo iz leta 1586. Svojega nekdanjega profesorja Frischlina je po astronomski in matematični plati nadvse slabo ocenil v dopisu, predanem vojvodi 18. 1. 1586. Nekaj mesecev pred Trubarjevo smrtjo v bližnjem Derendingenu je Maestlin našel pri Frischlinu matematične napake, citiral pa je celo staro zavezo v dokaz Frischlinovih napačnih pojmovanj videza Sonca in Lune.³⁴

Ni mu bilo všeč Frischlinovo odklanjanje astrologije in "pesniški" dvom o uporabi matematike v astronomiji. Predvsem pa Maestlinu ni dišal Frischlinov sprejem Gregorijanskega papeškega koledarja. Kopernikanec Maestlin je vzel v precep predvsem Frischlinovo ostro kritiko Kopernika, kar se mu nikakor ni zdelo nepomembno. Tako kot njegov učenec Kepler je v astrologiji med drugim videl tudi naravni vir zaslužka poklicnih astronomov, ki si ga nikakor ni pustil vzeti.

Član Akademije Združenih (sv. Dizme) in Terpinov naslednik na položaju škofijskega vikarja, Carl Peer, je v Ljubljani hranil Frischlinovo Astronomijo (1586) v trdnih usnjenih platnicah med svojimi 1022



Slika 10: Frischlinova skica zodiaka ob razlagi spremenljive hitrosti Sonca v vakuumu vesolja (Frischlin, 1586, 237)

deli v 2019 zvezkih. Peerov izvod Frischlinovega dela je danes v NUK-u, več zakladov iz Peerove zbirke pa je podedovala Semeniška knjižnica.

6 LJUBLJANSKI ZAMETEK PARNIH STROJEV

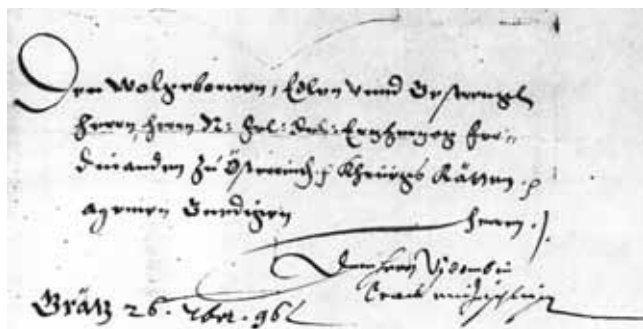
Vakuum Kranjcem Trubarjevih dni ni bil le teorija, temveč tudi orodje praktičnih izumov, prednikov parnih strojev. Malo po Trubarjevi smrti je 20. 9. 1596 Gregor Corissa iz Ljubljane poslal nadvojvodi Ferdinandu in vicedomu v Ljubljano dopis na treh straneh o izumu ognjene krogle Joachima Turekha, ki je bil verjetno prav tako Ljubljčan.³⁵ Dopis je obenem naslovil še na štiri prisednike komore. Ognjeno kroglo naj bi se dalo uporabiti na 100 miljah razdalje in celo nastaviti tako, da bi se sprožila in

³² Weichenhan, 2004, 532–536; Frischlin, 1586, 4 (verzi 97–100, 105–110), 8.

³³ Methuen, 1998, 119; Frischlin, 1586, 6, 33, 50, 181, 221, 222, 231.

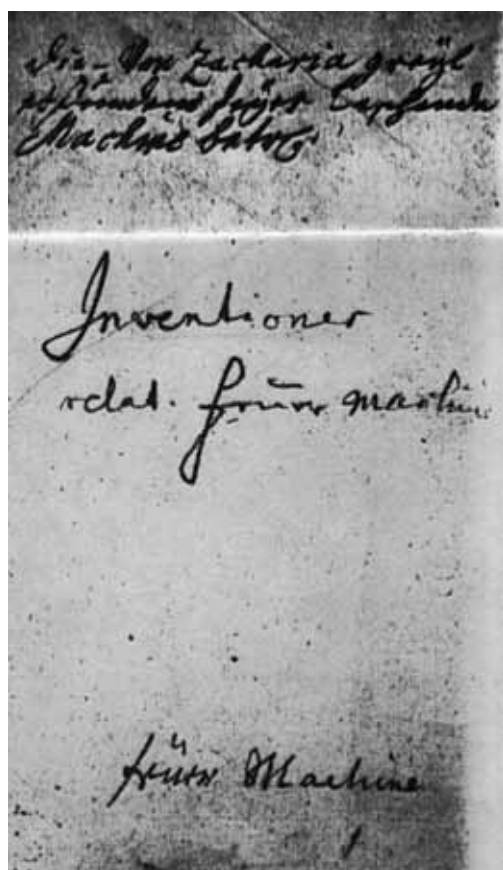
³⁴ Maestlin, 1584, fol 10; Methuen, 1998, 129.

³⁵ AS, Vicedomov arhiv, šk. 181, fasc. I/102, IX-2.



Slika 11: Ljubljanska ognjena krogla iz leta 1596 – naslovnica vladarjevega ukaza, podpisanega 7. 10. 1596 v tedanji graški prestolnici, s pečatom pri vrhu (Arhiv Slovenije, Vicedomov arhiv, šk. 181, fasc. I/102, IX-2, str. 4).

delovala po 24 urah; torej neke vrste srednjeveška tempirana bomba. Od sebe je dajala močan ogenj. Turekh je uporabil Heronova antična dognanja o vakuumu, zračnem tlaku in zasnovah parnih strojev. Svoj izum je predal Corissu, ki je delovanje Turekhovih domislic želel pokazati nadvojvodi Ferdinandu II., 26. 9. 1596 pa je poslal še en dopis, nadvojvoda pa mu je odgovoril 7. 10. 1596.



Slika 12: Ljubljanska ognjena krogla na vakuumskih principih iz leta 1596: naslovnica poročila o izumu "ognjenega stroja" (Arhiv Slovenije, Vicedomov arhiv, šk. 181, fasc. I/102, IX-2, str. 31).

³⁶ Belii, 1971, 30, 260–261.

³⁷ Vidmar, 2000, 10, 24.

³⁸ Kepler, 1984, 240, 242, XXIV.

7 KEPLER MED PREKMURCI

Frischlinov mlajši tübingenski kolega Kepler je kot štajerski deželni matematik pustil globoko sled v razvoju znanosti na današnjem slovenskem Štajerskem. Kako globoko? Kolikšen je bil njegov vpliv na razmišljanja o vakuumu pri nas?

Najpomembnejša stanovska šola (*Stiftsschule*) v habsburških dednih deželah je delovala v Gradcu od 1. 6. 1574 do leta 1602. Kepler je v njej poučeval od 11. 4. 1594 do 28. 9. 1597, do leta 1600 pa je pouk nadaljeval tako rekoč brez študentov.³⁶ Po reformiranem šolskem redu iz leta 1594 so v zadnjem četrtem javnem razredu (*quarta classis, quae publica dicta*) v Gradcu in Ljubljani poučevali matematiko in fiziko.³⁷

Dne 11./21. 4. 1594 je Kepler prišel v Gradec, čeprav še ni končal študija v Tübingenu, kar bi moral storiti poleti 1594. Keplerjev prijatelj, slovenski protestant Sigmund Friderik Herberstein, je bil oproda, odgovoren za "sekanje mesa na dvoru". Septembra 1595 se je Kepler v posvetilu Misteriju rahlo norčeval s puščico na ta Herbersteinov sicer donosni, vendar srednjeveško zastareli naslov. Herberstein je bil rojen na Šahenturnu v današnji Gornji Radgoni na Prešernovi cesti št. 1 kmalu po prvi izdaji Kopernika. Herberstein je bil med prvimi bralci Keplerjevega Misterija skupaj z Maestlinom, profesorji in študenti univerze Tübingenu, štajerskimi plemiči, Keplerjevimi podporniki, Galileijem in Tycho Brahejem.³⁸ Kepler je pisal Misterij od julija 1595 do januarja 1596 in se je sproti posvetoval z Maestlinom. Februarja 1596 je šel dopustnik Kepler objaviti svoje Misterije v Tübingen, obenem pa je pripravil poroko z dvajsetletno protestantko Barbaro Müller iz Gradca, dvakratno vdovo s hčerko. V Misterijih je kot poklicni astronom prvi objavil prepričljivo geometrijsko razlago Kopernikove teorije gibanja nebesnih teles v vakuumu, ki je šele s tem delom dobila pravi zamah; dotlej jo je podpirala le kakšna deseterica astronomov.

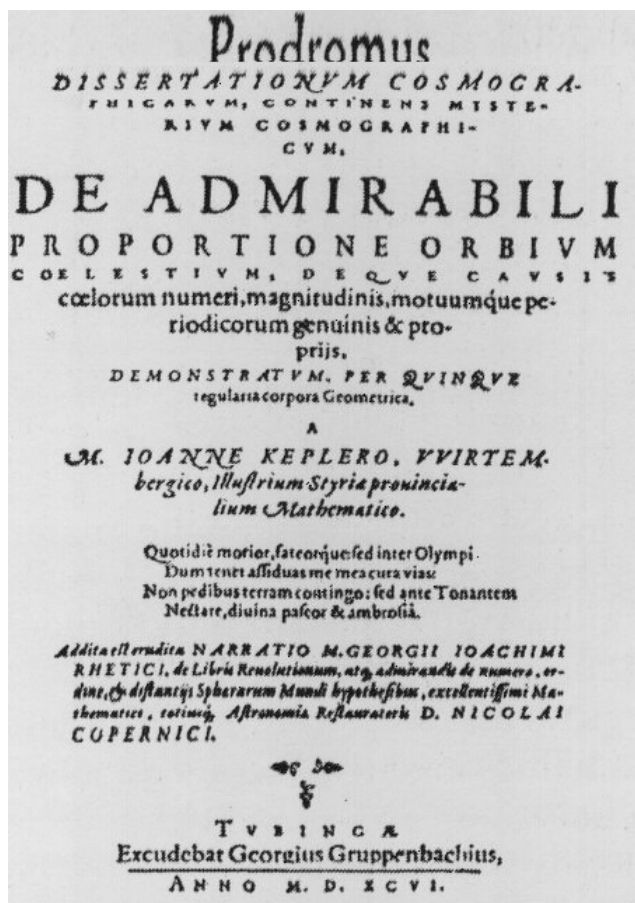


Slika 13: Keplerjeva spominska plošča na stavbi Paradeishof številka 1 v Gradcu, kjer je poučeval (Foto: Bruno Besser, 2005)

Kepler si je dopisoval tudi z Galileijem, čeprav ni soglašal z vsemi njegovimi opisi vakuumu.

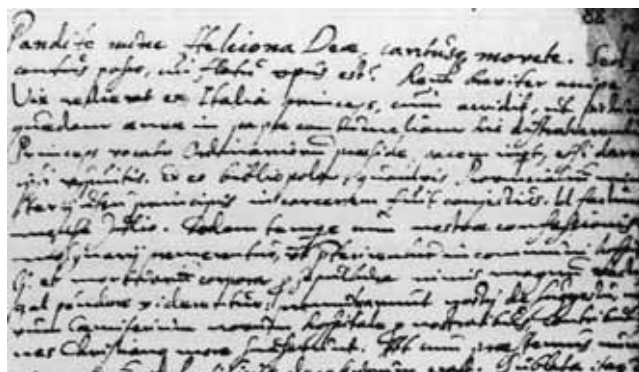
Kepler je v besedilo *Mysterija* vstavil več geometrijskih slik. Orbite planetov je povezal s petimi tedaj znanimi pravilnimi liki. Kocko je postavil med Saturn in Jupiter, tetraeder pa med Jupiter in Mars. Še v *Harmonices Mundi* (1619) je Kepler uporabljal pravilne like za razmejitev orbit posameznih planetov, čeprav je medtem že ugotovil, da model ne more biti povsem točen. Ideja je bila povezana s Keplerjevimi razmišljanji o simetriji kristalov, objavljeni v praških opazovanjih prvih snežink na novo leto 1611. Razmišljanja o površinah in kristalnih oblikah je povezoval s kovinskimi spojinami samimi in tako snoval alkimijske povezave planetov in kovin, ki se še danes kažejo pri imenu Merkurja.

V Keplerjevih mladih letih so za vekomaj prešli časi strpnosti do protestantskih veroizpovedi. Novi veter je napovedal nadvojvoda Ferdinand II., ki je 23. 9. 1598 zapovedal vsem protestantskim pastorm in učiteljem, naj zapustijo Gradec v šestih dneh. Ukrep se je vsem prizadetim sprva zdel nemogoče oster. Dne



Slika 14: Naslovnica Keplerjevih *Mysterium Cosmographicum* iz leta 1596, ki ga je isti tübingenški tiskar Georg Gruppenbach izdal leto dni po Trubarjevem prevodu *Hišne Postile*. Ob delu sta se Trubar in Kepler pogosto srečavala

³⁹ Röckelein, Bumiller, 1990, 107.



Slika 15: Keplerjevo pismo iz Gradca 8. 12. 1598 učitelju Maestlinu v Tübingen s poročilom o bivanju v Petanjcih v 40. vrstici (Stuttgart, Württembergische Landesbibliothek, Cod. Math. Fol. 14a, listi 78–86)

28. 9. 1598 jim je ukazal, naj zapustijo Gradec do sončnega zahoda, štajersko in druge dežele notranje Avstrije pa v nekaj dneh pod grožnjo smrtne kazni. Čez mesec dni (29. 10. 1598) je enak ukrep doletel še ljubljanske pridigarje in predavatelje. Kepler se je s približno 40 drugimi učitelji in pastori iz Gradca in Radgone napolnil proti posesti Zrinjskih v Varaždinu. Nasilje so ublažili tako, da so jim za popotnico dali zadnjo plačo, pregnanci pa so se ustavili že v gradu na bližnjem posestvu grofa Nádasdyja v Petanjcih na cesarskem Ogrskem Prekmurskem, le nekaj kilometrov vzhodno od Radgone. Uporabljali so cerkev v bližnji Tišini. Bili so prvi protestanti v teh, danes slovenskih krajih. Ker niso poznali slovenskega jezika domačinov, so od njih težko nabavljali hrano, ki so jo zato dovažali kar iz Radgone. Sam Kepler se je zaradi dobrih odnosov z bavarskim katoliškim kanclerjem in graškimi jezuiti lahko že čez dober mesec vrnil v Gradec, medtem ko so drugi še naprej bivali v Prekmurju. Keplerju je še posebej pomagala njegova služba deželnega matematika, ki ni bila odvisna od političnih okoliščin, povezanih z vero, tako da je imel edini možnost za vrnitev po enem mesecu izgnanstva. Keplerjev "izlet" v Prekmurje je dodatno pripomogel k odmevnosti njegovih teorij vakuumu in kristalnih površin v naših krajih, kjer so številni petični bralci kupili njegova dela. Svoje ideje o površinah kristalov je objavil v Pragi neposredno po vrnitvi iz naših krajev, tako da jih je gotovo vsaj do neke mere zasnoval med Prekmurci.

8 SKLEP

Posebne okoliščine so pred začetkom protireformacije v notranjeavstrijske prestolnice pripeljale sam cvet tübingenskih učenjakov: v Ljubljano Frischlina, v Celovec Megiserja in v Gradec Keplerja.³⁹

Tübingen tako ni oskrboval Slovence le s slovenskimi Trubarjevimi protestantskimi tiski, temveč

tudi s plodnimi novimi idejami o vakuumu, kristalih in površinah. Oboje je obrodilo sadove v naslednjih generacijah, ko je ljubljanski knez Janez Vajkard Turjaški, ki je v rani mladosti prestopil iz protestantske v katoliško vero, postal poglaviti Guericejev pomočnik pri vakuumskih poskusih. Janezovi predniki so bili širokogrudni podporniki Trubarja, ki je bil podložnik Janezovega deda, nekdanjega padovskega študenta barona Krištofa Turjaškega, stanovskega odposlanca na državnem zboru v Augsburgu leta 1582.

9 LITERATURA IN VIRI

9.1 Neobjavljeni viri in okrajšave

AS – Arhiv Slovenije, Ljubljana.

HHStA, FAA – Katalog ljubljanske turjaške knežje knjižnice 1668/1672 (*Haus-, Hof- und Staatsarchiv, Dep. Fürstlich Auerspergsches Archiv*, VII Laibach, A 14/4 conv. 1 Laibach-Fürstenhof 1729–1895, Dunaj, Minoritenplatz 1).

Maestlin, Michael. 1584. *Iudica de opere astronomico D. Frischlini*. Predano vojvodi v Tübingenu dne 18. 1. 1586 (*Hauptstaatsarchiv Stuttgart*, A 274 Bü 45 & Bü 46., fasc. 13, no. 30).

Terpin, Filip. 1655. *Index librorum et authorum bibliothecae Oberburgensis excellentissimi et reverendissimi principis episcopi Labacensis conscriptus per reverendum dominum Philippum Terpin vicarium generalem anno 1655 (NŠALj, Škofijski arhiv (Ljubljana). Fascikel 96/14).*

9.2 Literatura

Ahačič, Kozma. 2007. *Zgodovina misli o jeziku in književnosti na Slovenskem: protestantizem*. Ljubljana: ZRC SAZU.

Belii, Ju.A. 1971. *Johann Kepler*. Moskva: Nauka.

Bratti, Ivan. 1590. *Discorso della vecchia et nuova medicina, nel quale si ragiona delle cose ritrovate à nostri secoli, & particolarmente dell'oro artificiale*. Benetke: Nicolò Meietti. 2: 1592. Benetke: Paolo Meietti.

Crombie, A.C. 1970. *Da S. Agostino a Galileo*. Milano: Feltrinelli.

Csendes, Peter; Opll, Ferdinand. 2001. *Wien*. Wien: Böhlau.

Dadić, Žarko. 1994. *Hrvati i egzaktne znanosti u osvitu novovekovlja*. Zagreb: SNL.

Filipović, Ivan; Rajhman, Jože. 1982. Vergerius (Vergerij, Vergerio) Peter Pavel ml. (geslo). *SBL*. 4: 407–409.

Frischlin, Nikodem. Marec ali april 1573. *Consideratio de nova stella, quae mense Novembri anno salutis MD LXXII in signo Cassiopeae populus septentrionalibus longe lateque apparuit*. Tübingen: Gruppenbachius. 1–26. Privezano: Maestlin, Michael. 1573. *Demonstratio astronomica loci stellae nova, tum respectu centri mundi, tum respectu signiferi & aequinoctialis*. 27–32. Privezano: Frischlin. 25. 12. 1572. *pismo princu Friedericu von Württembergu*. Ponatis Maestlinovega dela: 1620. *Tycho Brahe Astronomiae Instauratae*. Praegae.

Frischlin, Nikodem. 21. 2. 1586. *De astronomiae artis, cum doctrina coelesti, et naturali philosophia, congruentia, ex optimis quibusque Graecis Latinisque scriptoribus, theologis, medicis, mathematicis, philosophis & poetis collecta: libri quinque. Passim inserta est huic operi solida divinationum astrologicarum confutatio, repetita ex optimis quibusque auctoribus, tam recentibus quam veteribus, quorum nomina post praefationem inuenies*. Francoforti ad Moenum: Joannes Spieß. Ponatis: 1601. Francoforti: Wolfgang Richter, Joannes Spieß.

Frischlin, Nikodem. 1598. *Orationes insigniores...* Francoforti ad Strassburg: Bernhard Jobin.

Hvale (Qualle), Mathia. 1513. *Habes hic amande lector textum parvali, quod adjunt phie (=philosophia) naturalis cum comentariis eruditissimi viri magistri Mathi Qualle Carniolani, et Collegae gymnasii Viennensis summa vigilantia e gravissimis authoribus decerptis, qui conducunt maxime, cim aliis, tum his, qui vie nominalium addicti*

proficiunt. Hagenau: Joannis Rynman/Henric Gran (NUK-R 4499, ekslibris *Bibliot. Oberburgensi Episcopi Labacensi*; 179 strani; 19 cm). Ponatis: 1517.

Kepler, Johann. 1984. *Le secret du monde*. Pariz: Société d'édition "Les belles lettres".

Kidrič, France. 1925. Bonomo Peter (geslo). *SBL*. 1: 53–54.

Kranjc-Vrečko, Fanika. 2002. Splošna prepisovalna načela. V: *Zbrana dela Primoža Trubarja I*. Ljubljana: Rokus. 542–568.

Mayr, Janez Krstnik. 1678. *Catalogus Librorum qui Nundinis Labacensibus Autumnalibus in Officina Libraria Joannis Baptistae Mayr. Venales proftant*. Labaci: Mayr.

Melanchthon, Philipus. 1560. *Initia doctrinae physicae dictata in Academia Viterbergensi*. Leipzig: Rhambaw.

Methuen, Charlotte. 1998. *Kepler's Tübingen: Stimulus to a theological mathematics*. Aldershot: Ashgate.

Pintar, I. 1949. Najstarejša od slovenskega avtorja priobčena anatomsko podoba. *Zdravstveni vestnik*. 53–56.

Rajhman, Jože. 1982. Trubar (Truber) Primož (geslo). *SBL*. 4: 206–225.

Rajhman, Jože. 1986. *Pisma Primoža Trubarja*. Ljubljana: SAZU.

Röckelein, Hedwig; Bumiller, Casimir. 1990. *Nikodemus Frischlin: ein unruhig Poet Nikodemus Frischlin 1547–1590*. Balingen: Veröffentlichungen des Stadtarchivs.

Rupel, Mirko. 1966. *Slovenski protestantski pisci*. Ljubljana: Državna založba.

Santorio, Santorio. 1614. *De medicina statica*. Benetke. 3. izdaja: 1634. *Ars... de statica medicina et de responsione ad staticomasticem. Aphorismorum sectionibus septem comprehensa*. Benetke: Marc'Antonio Brogiollo (12°, 125 mm x 66 mm). Ponatis: 1660. *Opera omnia*.

Santorio, Santorio. 1625. *Commentaria in primam seu primi libri Canonis Avicennae*. Benetke.

Simoniti, Primož. 1974. Med knjigami iz stare gornjegrajske knjižnice. *Zbornik Narodne in univerzitetne knjižnice*. Ljubljana: NUK. 17–48.

Sodnik-Zupanec, Alma. 1975. *Izbrane razprave*. Ljubljana: Slovenska matica.

Uršič, Milena. (1975). *Jožef Kalasanc Erberg in njegov poskus osnutka za literarno zgodovino Kranjske*. Ljubljana: SAZU.

Valvasor, Janez Vajkard. 1689. *Die Ehre deß Hertzogthums Crain*. Laybach-Nürnberg: Wolfgang Moritz Endter. Ponatis: 1971. München: Trofenik. 1–4. Delni prevod: 1977. Ljubljana: Mladinska knjiga.

Vidmar, Tadej. 2000. "Obena deshela, ne meistu ne gmaina, ne mogo pres shul" – Usoda protestantskih deželniš šol v Ljubljani, Celovcu in Gradcu. *Šolska kronika*. 9(33)/1: 9–27.

Weichenhan, Michael. 2004. *"Ergo perit coelum...": Die Supernova des Jahres 1572 und die überwindung der aristotelischen Kosmologie*. Stuttgart: Franz Steiner.

Kazalo imen manj znanih oseb

Škof Albertus Magnus (grof Bollstädt, * 1193 Lauingen na Bavarskem; † 15. 11. 1280 Köln)

Edward Brown (* 1642; † 1708)

Nikodem Frischlin (* 22. 9. 1547 Balingen; † 29. 11. 1590 Hohenurach na Württenberškem)

Matija Hvale (Qualle, * okoli 1470 Vače pri Litiji; † po 1520)

Klemen Kukec (Clemens Kukitz, * okoli 1500 Metlika; † 1541 Dunaj)

Pavel Obersteiner (Steiner, * okoli 1480 Radovljica; † po 1544)

William Ockham (* okoli 1280 Ockham; † 1349 München)

Carl Peer (* 1697; † 1776)

Bernhard Perger (* okoli 1640 Ščavnica v Slovenskih goricah (Stanz); † okoli 1502 Dunaj)

Andrej Perlah (Perlach, Perlachius, * 1490 Svečina pri Mariboru; † 11/19. 6. 1551 Dunaj)

Santorio Santorio (* 29. 3. 1561 Koper; † 22. 2. 1636 Benetke)

Jurij Sladkonja (* 21. 3. 1456 Ljubljana; † 26. 4. 1522)

Jakob Strauss (* 1533 Ljubljana; † 28. 6. 1590 Celje)

Filip Terpin (Trpin, * 1603/5 Selca nad Škofjo Loko; † 23. 6. 1683 Šmartno pri Kranju)

baron Krištof Turjaški (* 27. 10. 1550 Turjak; † 14. 5. 1592 Ljubljana)

baron Ivan Ungnad (* 1493; † 27. 12. 1564 Vintřov)

Anton Urbas (* 13. 9. 1822 Idrija; † 22. 9. 1899 Ljubljana)

Juraj Zrinski (* 12. 4. 1549 Čakovec; † 4. 5. 1603)

NAVODILA AVTORJEM

NAVODILA AVTORJEM PRI PRIPRAVI PRISPEVKOV ZA STROKOVNI ČASOPIS VAKUUMIST

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

PRIPRAVA ROKOPISA

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

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

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

ILUSTRACIJE

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

LITERATURA

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

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

AVTORSKE PRAVICE

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

Uredništvo periodične publikacije Vakuumist:

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

Rokopise pošljite na naslov:

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

You and Varian: the Winning Team.



Get the benefits of a global supplier of Vacuum Technology:

- A pioneer in the vacuum industry for over 50 years
- 24 hours Service Support available worldwide
- Innovative Turbomolecular pump line with controllers on board
- Full range of Diffusion, Rotary Vane and Scroll pumps
- World leader in Ion Pumps and Leak Detection technologies



New IDP-3 Dry Scroll Pump



Interactive catalog on CD

MEREL d.o.o.
Ob Gozdu 25, 2352 Selnica ob Dravi
Slovenia
Tel.: +386 2 229 7390
Fax: +386 2 229 7391
E-mail: info@merel.si

Inspiring Excellence™

www.varianinc.com/vacuum



VARIAN